



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO EXPERIMENTAL PARA
LA COMPROBACIÓN DE UN ENLACE DE TELECOMUNICACIÓN
INALÁMBRICO ÓPTICO PUNTO A MULTIPUNTO USANDO EL PLANO
DE FRESNEL”**

T E S I S

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO EN ELECTRÓNICA**

P R E S E N T A

ANDRÉS ALBERTO OLIVERA RAMÍREZ

DIRECTOR DE TESIS

M. C. FELIPE DE JESÚS RIVERA LÓPEZ

HUAJUAPAN DE LEÓN, OAXACA; FEBRERO DE 2006

Dedicatoria

A mis padres:
Andrés y Rosalba

A mi hermano:
Iván Enrique

Agradecimientos

Al director de tesis:

M.C. Felipe de Jesús Rivera López por haber propuesto y dirigido la presente tesis.

Al Grupo de Ciencias de la Imagen del INAOE:

Al Dr. Eduardo Tepichín Rodríguez y al Tec. Gustavo Ramírez Zavaleta por el invaluable apoyo prestado en la realización de la presente tesis.

Al profesor:

Juan Luis Hernández López por su colaboración para determinar las aproximaciones matemáticas de la distancia máxima del enlace punto a punto.

A la UTM:

Por brindarme la oportunidad de estudiar y por el gran apoyo recibido a lo largo de mi vida como estudiante.

Al INAOE:

Por el apoyo brindado a la realización de esta tesis.

Al CONACyT:

Por el apoyo brindado a la realización de esta tesis a través del proyecto PY-42822-F.

Índice

Índice.....	IV
Lista de figuras.....	VII
Lista de fotografías.....	IX
Lista de tablas.....	X
Prefacio.....	XI
Resumen.....	XII
Abstract.....	XIV
1. Introducción general.....	1
1.1 Antecedentes históricos.....	1
1.2 Introducción a los sistemas de comunicación inalámbricos ópticos.....	2
1.3 Objetivos generales.....	3
1.4 Objetivos específicos.....	3
1.5 Justificación.....	4
1.6 Propuesta.....	5
1.7 Organización de la tesis.....	6
2. Fundamentos para realizar una transmisión digital de audio.....	8
2.1 Introducción.....	8
2.2 Modulación por codificación de pulso (PCM).....	9
2.2.1 Acondicionamiento de una señal analógica previa a la digitalización.....	9
2.2.1.1 Amplificación de la señal y adición de voltaje de cd.....	10
2.2.2 Conversión de una señal analógica a señal digital.....	12
2.2.2.1 Muestreo.....	12
2.2.2.2 Cuantización.....	13

2.2.2.3 Codificación.....	14
2.2.3 Conversión de una señal digital paralela a una señal digital serie.....	16
2.2.4 Conversión de una señal digital serie a una señal digital paralela.....	17
2.2.5 Conversión de una señal digital a señal analógica.....	18
2.2.6 Filtrado.....	19
2.2.6.1 Características de un filtro pasabajas con respuesta Butterworth.....	20
2.2.6.2 Diseño de un filtro pasabajas con respuesta Butterworth.....	21
3. Elementos de un enlace de telecomunicaciones inalámbrico óptico.....	23
3.1 Introducción.....	23
3.2 Elementos de un enlace inalámbrico óptico punto a punto.....	23
3.2.1 Emisores de luz.....	24
3.2.1.1 Principales características de rendimiento de los emisores de luz....	24
3.2.1.2 Características del diodo láser (DL).....	26
3.2.2 Fotodetectores.....	26
3.2.2.1 Fotodiodo PIN.....	27
3.2.2.2 Fotodiodo avalancha.....	27
3.2.2.3 Principales características de rendimiento de los fotodetectores.....	27
3.3 Elementos de un sistema inalámbrico óptico punto a multipunto.....	29
3.3.1 Demultiplexor optoelectrónico.....	30
3.3.1.1 Pantalla de cristal líquido.....	31
3.3.1.2 Sistema óptico.....	32
3.3.1.3 Sistema de control electrónico.....	33
4. Integración del enlace inalámbrico óptico punto a punto y comprobación experimental de un enlace inalámbrico óptico punto a multipunto.....	34
4.1 Introducción.....	34
4.2 Integración del enlace inalámbrico óptico punto a punto.....	35
4.2.1 Transmisor.....	35
4.2.1.1 Fuente de información.....	36
4.2.1.2 Acondicionamiento de la señal previa a la digitalización.....	36

4.2.1.3 Digitalización de la señal de información.....	38
4.2.1.4 Conversión de señal digital paralela a señal digital serie.....	40
4.2.1.5 Modulador electro-óptico.....	41
4.2.1.6 Diodo láser semiconductor.....	43
4.2.2 Receptor.....	44
4.2.2.1 Fotodiodo PIN.....	45
4.2.2.2 Demodulador optoelectrónico.....	45
4.2.2.3 Acondicionamiento de la señal a niveles TTL.....	47
4.2.2.4 Conversión de señal digital serie a señal digital paralela.....	48
4.2.2.5 Convertidor digital analógico.....	50
4.2.2.6 Filtro pasabajas.....	50
4.3 Comprobación experimental de un enlace inalámbrico óptico punto a multipunto..	58
4.3.1 Transmisor.....	59
4.3.2 Receptor.....	59
4.3.2.1 Demultiplexor optoelectrónico.....	59
4.3.2.2 Sistema de control.....	61
4.3.2.3 Receptor individual de señal óptica.....	64
5. Conclusiones.....	66
Bibliografía.....	68
Apéndice A Diagrama del transmisor y del receptor.....	70
Apéndice B Código fuente del programa de control para el demultiplexor optoelectrónico.	73
Apéndice C Programas de los microcontroladores.....	78
Apéndice D Proceso de diseño del modulador electro-óptico.....	81
Apéndice E Aproximaciones para obtener la distancia máxima sin reflexiones en el enlace punto a punto.....	85
Apéndice F Demostración visual.....	97

Lista de figuras

Figura 1.1 Diagrama a bloques del enlace de comunicación inalámbrico óptico punto a punto.....	5
Figura 1.2 Diagrama a bloques del enlace de comunicación inalámbrico óptico punto a multipunto.....	6
Figura 2.1 Diagrama a bloques simplificado de un circuito de PCM.....	9
Figura 2.2 Amplificador de señal y sumador de voltaje de cd.....	10
Figura 2.3 Señal sinusoidal a la que se le ha aplicado un proceso de muestreo y Retención.....	13
Figura 2.4 Señal cuantizada codificada a 4 bits.....	14
Figura 2.5 Diagrama a bloques del ADC0820.....	15
Figura 2.6 Diagrama simplificado de un convertidor paralelo-serie de 4 bits.....	16
Figura 2.7 Diagrama simplificado de un convertidor serie-paralelo de 4 bits.....	17
Figura 2.8 Diagrama a bloques de un convertidor digital a analógico básico.....	18
Figura 2.9 Diagrama a bloques del DAC0800.....	19
Figura 2.10 Filtro VCVS pasabajas de segundo orden.....	21
Figura 3.1 Diagrama a bloques simplificado de un enlace de telecomunicaciones inalámbrico óptico punto a punto.....	23
Figura 3.2 Espectro de un emisor.....	25
Figura 3.3 Tiempo de respuesta de un emisor de luz.....	25
Figura 3.4 Respuesta espectral del fotodiodo FDS010.....	29
Figura 3.5 Diagrama a bloques simplificado de un enlace de telecomunicaciones inalámbrico óptico punto a multipunto.....	29
Figura 3.6 Diagrama del demultiplexor optoelectrónico.....	30
Figura 3.7 Rejilla bidimensional de amplitud.....	31
Figura 3.8 Sistema de control electrónico.....	33

Figura 4.1 Diagrama a bloques del enlace de telecomunicación inalámbrico óptico punto a punto.....	35
Figura 4.2. Diagrama a bloques del transmisor.....	36
Figura 4.3 Diagrama esquemático del bloque de acondicionamiento de señal.....	36
Figura 4.4 Diagrama de tiempos del modo <i>WR then RD</i> del ADC usado.....	39
Figura 4.5 Señal de control inyectada al ADC.....	39
Figura 4.6 Diagrama de tiempos de las operaciones y las señales generadas por el microcontrolador.....	41
Figura 4.7 Diagrama del modulador electro-óptico.....	42
Figura 4.8 Curva característica del diodo láser semiconductor DL7147-201.....	43
Figura 4.9 Diagrama a bloques del receptor.....	44
Figura 4.10 Diagrama del demodulador optoelectrónico.....	46
Figura 4.11 Diagrama de la etapa de acondicionamiento de la señal de información a niveles TTL.....	47
Figura 4.12 Señales y variables en el algoritmo de conversión serie – paralelo.....	49
Figura 4.13 Diagrama de la etapa de conversión de señal digital a analógica.....	50
Figura 4.14 Diagrama del filtro implementado.....	51
Figura 4.15 Respuesta del filtro implementado.....	52
Figura 4.16 Respuesta del enlace punto a punto.....	54
Figura 4.17 Potencia óptica en el enlace punto a punto.....	55
Figura 4.18 Aproximaciones para encontrar la distancia máxima sin reflexiones el enlace punto a punto.....	55
Figura 4.19 Diagrama a bloques del enlace punto a multipunto.....	58
Figura 4.20 Diagrama del demultiplexor optoelectrónico.....	59
Figura 4.21 Pantalla inicial del programa de control.....	61
Figura 4.22 Rejilla con la que se obtuvieron el mayor número de puntos donde se puede recuperar la señal.....	63
Figura E.1 Potencia óptica en el enlace punto a punto.....	86
Figura E.2 Primera aproximación de la distancia sin reflexiones.....	88
Figura E.3 Segunda aproximación de la distancia sin reflexiones.....	96

Lista de fotografías

Fotografía 4.1 Diodo láser semiconductor DL7147-201.....	44
Fotografía 4.2 Fotodiodo pin FDS010.....	45
Fotografía 4.3 Señal digital transmitida (canal 1) y la señal digital recuperada (canal 2)...	48
Fotografía 4.4 Sistema transmisor.....	52
Fotografía 4.5 Sistema receptor.....	53
Fotografía 4.6 Recuperación de la señal analógica de información en el enlace punto a punto.....	53
Fotografía 4.7 Reflexión mediante espejos del haz generado por el diodo láser semiconductor.....	54
Fotografía 4.8 Demultiplexor optoelectrónico.....	60
Fotografía 4.9 a) Rejilla desplegada en el monitor, b) Imagen de la rejilla en el plano de Fresnel.....	62
Fotografía 4.10 Sistema de control desconectando interconectores optoelectrónicos.....	63
Fotografía 4.11 Señal digital enviada (canal 1) y señal digital recuperada (canal 2).....	64
Fotografía 4.12 Señal analógica de entrada al ADC en el transmisor (canal 1) y señal analógica a la salida del receptor (canal 2).....	65

Lista de tablas

Tabla 2.1 Comparación de algunos ADC.....	14
Tabla 4.1 Valores de componentes usados en el circuito del modulador electro-óptico.....	42
Tabla 4.2 Características del diodo láser semiconductor.....	43
Tabla 4.3 Características del fotodiodo usado.....	45
Tabla 4.4 Componentes usados en la implementación del filtro pasabajas.....	51
Tabla 4.5 Características del enlace inalámbrico óptico punto a punto.....	57
Tabla 4.6 Tabla de las distancias focales usadas.....	60
Tabla E.1 Primeras 11 mediciones de potencia óptica en el enlace punto a punto.....	86
Tabla E.2 Tabla usada para calcular la primera aproximación	87
Tabla E.3 Mediciones de potencia óptica en el enlace punto a punto.....	89
Tabla E.4 Tabla usada para calcular la aproximación del segundo segmento.....	90
Tabla E.5 Tabla usada para calcular la aproximación del tercer segmento.....	91
Tabla E.6 Tabla usada para calcular la aproximación del cuarto segmento.....	92
Tabla E.7 Tabla usada para calcular la aproximación del quinto segmento.....	92
Tabla E.8 Tabla usada para calcular la aproximación del sexto segmento.....	93
Tabla E.9 Tabla usada para calcular la aproximación del séptimo segmento.....	94
Tabla E.10 Tabla usada para calcular la aproximación del octavo segmento.....	94
Tabla E.11 Tabla usada para calcular la aproximación del noveno segmento.....	95

Prefacio

Hoy en día la demanda de transferencia de información es cada vez mayor, por tanto, se desarrollan sistemas de telecomunicación cada vez más rápidos y eficientes. Los sistemas de telecomunicación inalámbricos ópticos son una alternativa que usa láseres y fotodetectores para establecer un enlace de telecomunicación de banda ancha. Estos sistemas están siendo utilizados en la actualidad porque presentan ventajas sobre los sistemas basados en cobre, radiofrecuencias (RF) e incluso fibra óptica. Considerando lo anterior se propone el diseño y construcción de un enlace de telecomunicación inalámbrico óptico punto a punto el cual pueda usarse para la enseñanza del tema y al mismo tiempo se despierte el interés por el estudio de esta alternativa de comunicación.

También existe la necesidad de distribuir señales en forma masiva y controlada, para esto existen sistemas de distribución que usan dispositivos electrónicos para controlar el flujo de información hacia los diferentes destinos. Estos dispositivos necesitan un tiempo para distribuir la señal hacia un destino específico, lo cual, disminuye la velocidad de transmisión del sistema. La propuesta de telecomunicación llamada “Demultiplexor optoelectrónico” distribuye una portadora luminosa en forma directa hacia múltiples destinos, con lo cual el tiempo utilizado para la distribución de la señal es igual a cero. Asimismo el demultiplexor optoelectrónico permite controlar la ruta por medio de interconectores optoelectrónicos controlados por medio de un programa desde una computadora personal. Por lo anterior se propone el diseño y construcción de un modelo experimental para la comprobación de un enlace de telecomunicación inalámbrico óptico punto a multipunto.

Resumen

La presente tesis tiene como objetivo diseñar y construir un enlace de telecomunicación inalámbrico óptico punto a punto y comprobar una propuesta de telecomunicación llamada “Demultiplexor Optoelectrónico”, la cual establece un enlace de telecomunicación inalámbrico óptico punto a multipunto.

El enlace de telecomunicación inalámbrico óptico punto a punto consiste en enviar una señal de audio digital a través de una portadora luminosa generada por un diodo láser semiconductor y recuperarla con un fotodiodo, usando la atmósfera como canal. La señal de audio se digitaliza con un convertidor analógico a digital (ADC, por sus siglas en inglés) con salida en paralelo. La señal digital paralela obtenida del ADC es transformada a una señal digital modulada por codificación de pulso (PCM, por sus siglas en inglés) por medio de un microcontrolador. Un modulador electro-óptico modula en amplitud a un diodo láser semiconductor mediante variación de corriente usando la señal PCM como señal modulante. El diodo láser semiconductor transmite la señal portadora luminosa a través de la atmósfera. La señal es recuperada por un fotodiodo el cual transforma la señal luminosa a una señal electrónica, esta señal representa la información PCM transmitida, posteriormente se procesa la señal PCM con un microcontrolador para obtener una señal digital paralela. Con un convertidor digital a analógico (DAC, por sus siglas en inglés) y un filtro pasabajas se recupera la señal de audio analógica.

La comprobación de la propuesta de telecomunicación llamada “Demultiplexor optoelectrónico” consiste en establecer un enlace de telecomunicación inalámbrico óptico punto a multipunto. Se transmite una señal de audio digital por medio de una portadora luminosa generada por un diodo láser semiconductor a través de la atmósfera de la misma

manera que en el enlace punto a punto. La portadora luminosa se transmite hacia el receptor en donde el demultiplexor optoelectrónico distribuye la portadora luminosa hacia múltiples puntos de detección por medio de un sistema óptico, un modulador espacial de luz dinámico y un sistema de control. La señal óptica de información es recuperada en múltiples puntos en el plano de Fresnel mediante un sistema receptor como el usado en el enlace punto a punto. Es importante resaltar que el sistema de control y el modulador espacial de luz dinámico permiten manipular el flujo de la señal óptica de información para cada punto de detección de manera individual.

Abstract

The aim of this thesis is to design and construct a point-to-point wireless opto-telecommunications link and to verify a proposed telecommunication system known as ‘Optoelectronic Demultiplexor’, which establishes a multipoint-to-point wireless opto-telecommunications link

The point-to-point wireless opto-telecommunications system consists in sending a digital audio signal through an optical carrier generated by a diode laser semiconductor and recover it with a photodiode using the atmosphere as a channel. The analog audio signal is digitized with an analog-to-digital converter (ADC from its English initials) with parallel output. The parallel digital signal obtained from the ADC is transformed to a pulse-coded modulated signal (PCM from its English initials) by means of a microcontroller. A diode laser semiconductor is modulated in amplitude by an electro-optic modulator which varies the current using the PCM signal as a modulating signal. The diode laser semiconductor transmits the optical carrier signal through the atmosphere. The optic signal is recovered by a photodiode that transforms the optical signal into an electronic signal; this signal represents the transmitted PCM information. Afterwards, the PCM signal is processed with a microcontroller to obtain a parallel digital signal. By means of a digital-to-analog converter (DAC from its English initials) and a low-pass filter the analog audio signal is recovered.

The verification of the opto-telecommunication system called an "Optoelectronic Demultiplexor" consists in setting up a point-to-multipoint wireless opto-telecommunications system. A digital audio signal is transmitted by an optical carrier generated by means of a diode laser semiconductor through the atmosphere in the same way as the point-to-point connection. The optical carrier in this connection is transmitted toward the receiver where the “Optoelectronic Demultiplexor” distributes the optical carrier toward multiple detection points

by means of an optical system, a Dynamic Spatial Light Modulator and a control system. The optical information signal is recovered at multiple points on the Fresnel Plane using a receiving system like the one used in the point-to-point connection. It is important to highlight that the control system and the Dynamic Spatial Light Modulator enable us to individually manipulate the flow of the optical information signal for each detection point.

Capítulo 1

Introducción general

1.1 Antecedentes históricos

La transmisión de información de un punto a otro por medio de luz ha existido desde hace mucho tiempo. Según escritos antiguos relatan la utilización de señales luminosas para transmitir información a través de grandes distancias [5]. Ya en 1880 Alexander Graham Bell inventó el fonógrafo que transmitía una onda de sonido a través de un haz de luz. El fonógrafo de Bell estaba basado en espejos y detectores de selenio pero no tuvo éxito ya que no era práctico ni confiable [11].

Durante la década de los cincuentas y al principio de los sesentas se desarrolló el LASER (Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation). En 1954 Charles Townes y Arthur Schawlow inventaron el MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) [14] y algunos años más tarde Theodore H. Maiman desarrolló el primer láser visible [7].

La idea de transmitir datos por medio de láseres surgió en los años sesentas y las investigaciones en este campo eran dirigidas principalmente al ejército y a la NASA (National Aeronautics and Space Administration).

Las fibras ópticas desarrolladas en la década de los sesentas tenían una atenuación excesivamente alta, aproximadamente de unos 1000 dB/Km, lo cual las hacía imprácticas ya que no permitían enlaces a grandes distancias. Fue en 1970 cuando Robert Maurer, Donald Keck y Karpon desarrollaron la primera fibra óptica capaz de transmitir información a través de largas distancias ya que tenía una atenuación menor a 20 dB/Km [9]. Con esto los investigadores se centraron más en la investigación del cable óptico y aunque se siguió

investigando en el campo de la comunicación óptica inalámbrica la industria se enfocó más en el desarrollo de la fibra óptica.

Para los años noventas las investigaciones volvieron al campo de la comunicación óptica por el espacio libre, ya que los fabricantes de láseres y componentes ópticos bajaron los precios de sus productos, con esto la comunicación óptica inalámbrica se hizo una alternativa económicamente posible para la creciente demanda de servicios de banda ancha.

Actualmente las comunicaciones ópticas por el espacio libre son utilizadas en muchos países para comunicaciones punto a punto, conexiones de última milla, respaldo de enlaces y redes ópticas, etc. Con un ancho de banda de hasta 1.25 Gbps y distancias de hasta 4 Km [URL2].

1.2 Introducción a los sistemas de comunicación inalámbricos ópticos

Los sistemas de comunicación inalámbricos ópticos utilizan diodos emisores de luz (LEDS) y láseres para generar una señal óptica que permita la transferencia de información, la cual, es recuperada por fotodetectores. Estos sistemas se caracterizan por ser sistemas de línea de vista y básicamente el medio de transmisión es la diferencia ante un sistema de comunicación basado en fibra óptica, ya que para los sistemas de comunicación inalámbricos ópticos el medio de transmisión es la atmósfera.

Actualmente existe una gran variedad de sistemas ópticos inalámbricos muy potentes los cuales son utilizados para cubrir las necesidades hacia la última milla, interconexión de puntos, respaldo de enlaces y redes ópticas, entre otros. Estos sistemas transmiten información como voz, audio, video y datos. Empresas como LIGHPOINTE, FSONA, MRV, PAV, entre otras, ofrecen gran variedad de productos y soporte para enlaces de telecomunicación inalámbricos ópticos.

Los avances logrados en esta tecnología están colocando a los sistemas de comunicación inalámbricos ópticos como una alternativa a los sistemas basados en cobre, radiofrecuencia y fibra óptica, ya que en diversas circunstancias presentan ventajas sobre estas tecnologías.

1.3 Objetivos generales

En la presente tesis se abordan tres objetivos principales:

El primero es de carácter formativo y consiste en adquirir conocimientos relacionados con el tema de las comunicaciones inalámbricas ópticas a través del uso de componentes optoelectrónicos y ópticos como láseres, fotorreceptores, pantallas de cristal líquido, lentes, polarizadores y espejos.

El segundo objetivo es de carácter didáctico y consiste en desarrollar un enlace de telecomunicación inalámbrico óptico punto a punto el cual pueda ser utilizado para la enseñanza de este tema.

Y el tercer objetivo consiste en demostrar experimentalmente una propuesta teórica de telecomunicación inalámbrica óptica punto a multipunto llamada demultiplexor optoelectrónico [28].

1.4 Objetivos específicos

Diseñar y construir un transmisor electro-óptico inalámbrico de señal luminosa. La longitud de onda es de 658 nm. La información a transmitir es audio digital.

Diseñar y construir un receptor optoelectrónico inalámbrico para la recuperación de la señal generada en el transmisor electro-óptico.

Construcción del sistema demultiplexor optoelectrónico el cual distribuye la señal luminosa a múltiples puntos donde puede ser detectada.

Establecer un enlace de comunicación inalámbrico óptico punto a multipunto mediante la conjunción del transmisor electro-óptico inalámbrico, el demultiplexor optoelectrónico y el receptor optoelectrónico inalámbrico.

Diseñar y desarrollar el software de control del demultiplexor optoelectrónico.

1.5 Justificación

La demanda de transferencia de información es cada vez más grande, por tanto, se desarrollan sistemas cada vez más eficientes que ayuden a resolver este problema. Actualmente existe interés en la utilización de sistemas inalámbricos ópticos, ya que estos sistemas proporcionan ventajas en ciertas circunstancias sobre los comúnmente usados, como pueden ser: sistemas basados en cobre, RF, fibra óptica, entre otros [URL11].

Comparándolos con sistemas basados en cobre y RF los sistemas de comunicación inalámbricos ópticos presentan la ventaja de que se puede lograr un ancho de banda mayor, aproximadamente de 1.25 Gbps. Otra de las ventajas que presentan sobre los sistemas RF es que no requieren de licencias de utilización de espectro electromagnético para su operación. Respecto a los sistemas basados en fibra óptica los sistemas ópticos de comunicación inalámbrica son más fáciles de instalar o modificar físicamente [23]. Es por esto que se propone la elaboración de un enlace punto a punto para la enseñanza de este tema y despertar el interés hacia esta alternativa de comunicación, además que sirve como un enlace previo para el desarrollo experimental del demultiplexor optoelectrónico.

También existe la necesidad de redistribuir señales a gran velocidad y hacia múltiples usuarios, para esto actualmente se usan sistemas de comunicación híbridos, es decir, sistemas que para redistribuir la información tienen que convertir la señal óptica de información en una señal electrónica de información y posteriormente convertirla en una señal luminosa de información [15]. Tal es el caso de los sistemas de comunicación diseñados y patentados en Estados Unidos de América por Doerr [20], Hara [22], Majima [24], por tanto, al redistribuir las señales de información se pierde toda la velocidad del enlace lograda por el uso de la fibra óptica y portadoras luminosas. El sistema de comunicación patentado por Friesem [21] usa un sistema todo-óptico, donde emplea hologramas, pero tiene la desventaja de no ser dinámicamente reconfigurable. Éste es el principal problema de un sistema todo-óptico, el de no tener la capacidad de ser reconfigurable pero tiene la gran ventaja de realizar procesamiento de información a muy alta velocidad [29].

La propuesta de comunicación llamada demultiplexor optoelectrónico distribuye una señal óptica de información de manera directa, como en un sistema todo-óptico, y se tiene una gran flexibilidad de reconfiguración como en un sistema híbrido. Por lo anterior se propone la comprobación experimental de dicha propuesta.

1.6 Propuesta

Como primera etapa del proyecto se propone la realización de un enlace de telecomunicación inalámbrico óptico punto a punto.

Características principales:

- Unidireccional
- Velocidad de transferencia de bits = 400 Kbps.
- Longitud de onda de la señal luminosa (λ) = 658 nm.
- Información analógica: audio.
- Distancia del enlace = 26 m.

En la figura 1.1 se presenta el diagrama a bloques del enlace de telecomunicación inalámbrico óptico punto a punto.

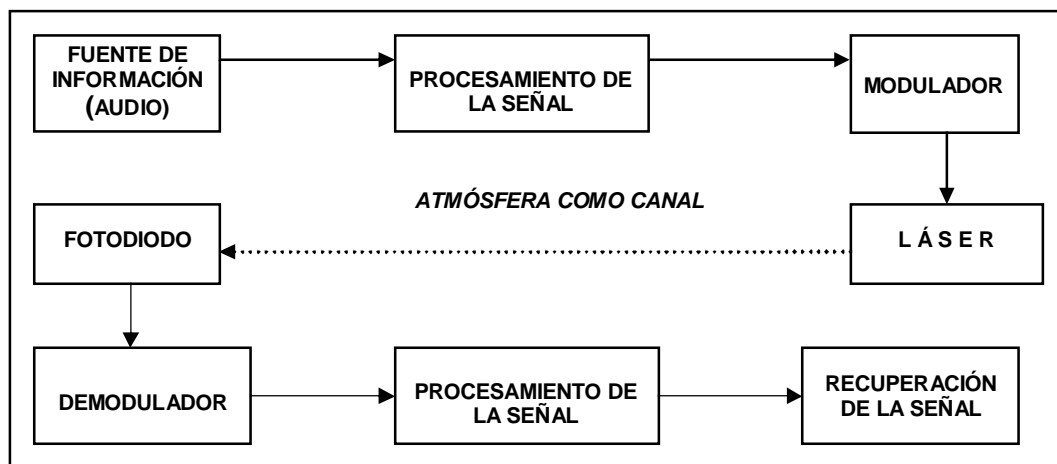


Figura 1.1 Diagrama a bloques del enlace de comunicación inalámbrico óptico punto a punto

Como segunda etapa del proyecto se propone la comprobación experimental de un enlace de telecomunicación inalámbrico óptico punto a multipunto llamado demultiplexor optoelectrónico.

Características principales:

- Unidireccional
- Velocidad de transferencia de bits = 400 Kbps.
- Longitud de onda de la señal luminosa (λ) = 658 nm.
- Información analógica: audio.
- Número de interconexiones optoelectrónicas = 247.

En la figura 1.2 se presenta el diagrama a bloques del enlace de comunicación inalámbrico óptico punto a multipunto.

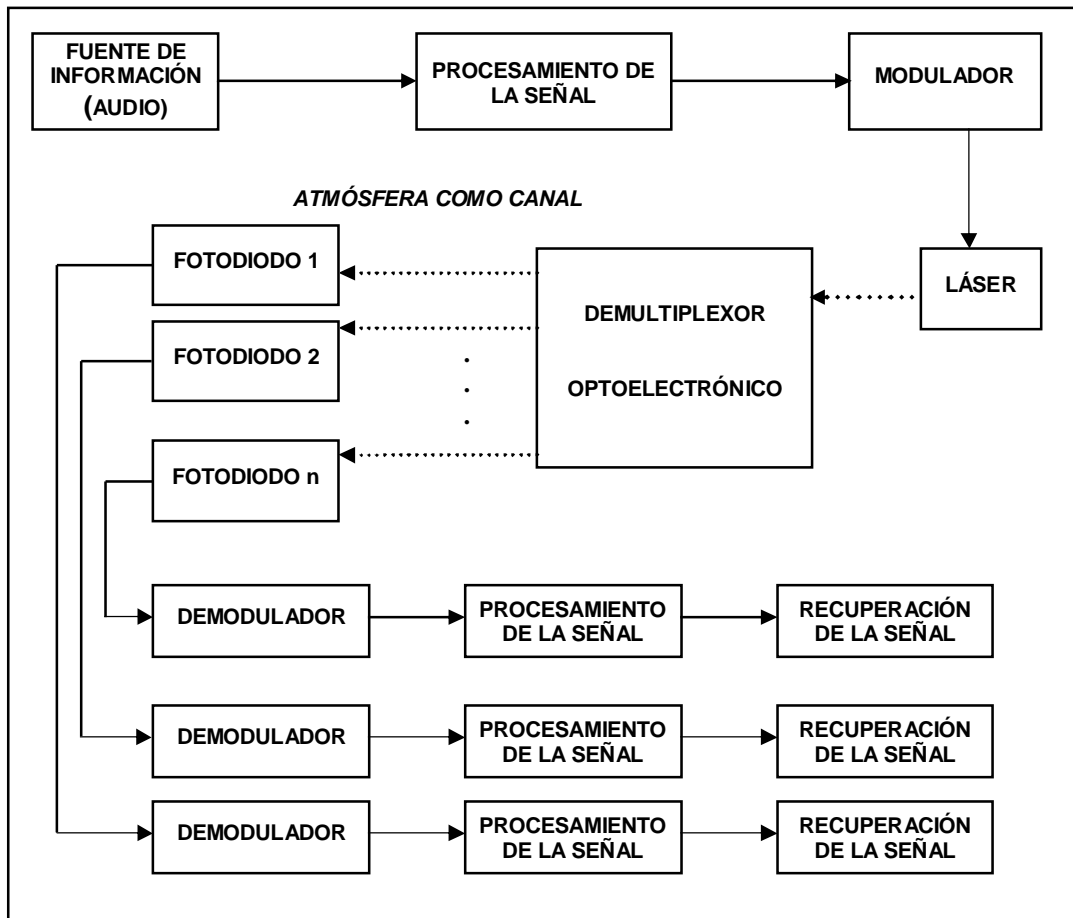


Figura.1.2 Diagrama a bloques del enlace de comunicación inalámbrico óptico punto a multipunto

1.7 Organización de la tesis

La presente tesis está organizada de la siguiente manera:

En el capítulo 1 se presenta una introducción general al tema así como la idea general del proyecto.

En el capítulo 2 se presentan los fundamentos teóricos para realizar una transmisión digital de audio.

En el capítulo 3 se presentan los elementos que conforman un enlace punto a punto así como los que componen un enlace punto a multipunto. Esto comprende elementos como el láser, fotodetector, modulador espacial de luz dinámico y el sistema óptico.

En el capítulo 4 se presenta el desarrollo del enlace inalámbrico óptico punto a punto y la comprobación del enlace inalámbrico óptico punto a multipunto. Esto incluye el diseño y construcción del transmisor electro-óptico inalámbrico de audio digital, el receptor optoelectrónico inalámbrico de audio digital, el demultiplexor optoelectrónico y el software de control.

En el capítulo 5 se presentan las conclusiones generales de la tesis.

En el apéndice A se muestra el diagrama electrónico del receptor y del transmisor.

En el apéndice B se muestra el código fuente del programa de control para el demultiplexor optoelectrónico.

En el apéndice C se muestran los programas de los microcontroladores.

En el apéndice D se muestra el proceso de diseño del modulador electro-óptico.

En el apéndice E se muestra el proceso para calcular las aproximaciones a la distancia máxima en el enlace punto a punto.

El apéndice F contiene un DVD con una demostración visual del enlace inalámbrico óptico punto a punto y punto a multipunto.

Capítulo 2

Fundamentos para realizar una transmisión digital de audio

2.1 Introducción

La transmisión de señales digitales se puede realizar de distintas maneras, una de ellas puede ser transmitiendo pulsos en banda base (transmisión digital) y otra por medio de la transmisión de portadoras moduladas en forma digital (radio digital) [17].

La transmisión digital consiste en transmitir pulsos digitales entre dos puntos dentro de un sistema de comunicaciones [17]. Existen varias formas de representar la información por medio de pulsos, las más conocidas son: modulación de ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés), modulación de posición de pulso (PPM, por sus siglas en inglés), modulación de amplitud de pulso (PAM, por sus siglas en inglés) y modulación por codificación de pulso (PCM, por sus siglas en inglés). La técnica de modulación por codificación de pulso (PCM) es la más utilizada para la transmisión digital [17] y es la que se utiliza en el desarrollo experimental de la tesis.

Entre las técnicas de radio digital se encuentran la de modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK, por sus siglas en inglés), modulación por desplazamiento de fase (PSK, por sus siglas en inglés), y modulación de amplitud en cuadratura (QAM, por sus siglas en inglés).

En el presente capítulo se explica la técnica de transmisión digital denominada modulación por codificación de pulso (PCM) abordando temas tales como: el acondicionamiento de la señal previo a la digitalización, el proceso de conversión de una señal analógica a digital y de una señal digital a analógica, conversión de una señal digital paralela a una señal digital serie y de una señal digital serie a una señal digital paralela, filtrado de una señal analógica, entre otros.

2.2 Modulación por codificación de pulso (PCM)

La técnica de modulación por codificación de pulso consiste en tomar muestras de una señal analógica, cuantizarlas y codificarlas a una señal digital serie, en la cual los pulsos son de longitud y amplitud fija [17]. Cada muestra de la señal analógica es representada por una cadena de bits, es decir, un número binario el cual varía de acuerdo a la amplitud de la muestra. Estos pulsos son enviados a través de un medio hacia el receptor. En el receptor la señal digital es convertida a una señal analógica la cual se filtra para recuperar la señal original.

En la figura 2.1 se muestra un diagrama simplificado a bloques del circuito de PCM implementado en el desarrollo experimental de la tesis.

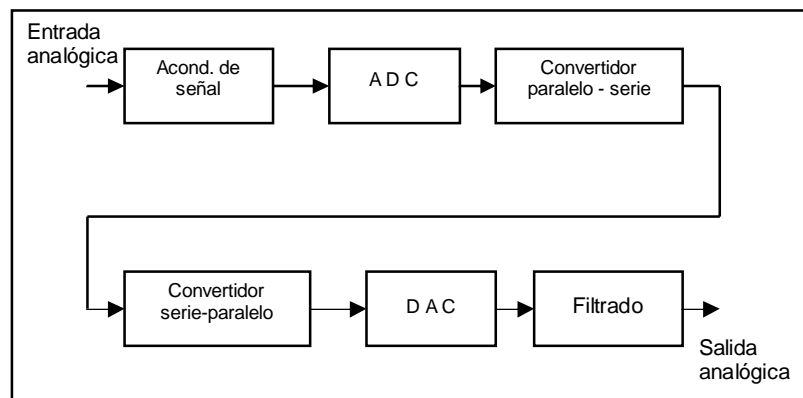


Figura 2.1 Diagrama a bloques simplificado de un circuito de PCM

En las siguientes secciones se describe cada uno de los procesos incluidos en la técnica de modulación por codificación de pulso.

2.2.1 Acondicionamiento de una señal analógica previa a la digitalización

Si se desea enviar digitalmente señales analógicas de información, por ejemplo, las generadas por procesos continuos como el sensado de variables físicas o en este caso señales de audio, es necesario digitalizarlas, para esto se requiere que éstas tengan ciertas características exigidas por el convertidor analógico a digital (ADC). El ADC usado en el desarrollo de la tesis (ADC0820 de National Semiconductor) [URL4] al igual que un gran número de ADC comerciales necesitan una entrada analógica la cual tenga valores máximos de 5V y mínimos de 0V [URL4]. Si la señal analógica no tiene estas características se tiene

que acondicionar para que pueda ser digitalizada de manera adecuada por el ADC, es decir, se tiene que amplificar la señal y sumarle un nivel de voltaje de corriente directa (cd). A continuación se describen estos procesos.

Una señal analógica como ya se ha dicho debe tener cierto valor en amplitud para que pueda ser digitalizada de forma adecuada. Generalmente la amplitud requerida por los ADC comerciales es de 5V como máximo. La amplificación de la señal analógica se puede realizar usando diversos dispositivos electrónicos como por ejemplo transistores, amplificadores operacionales, entre otros. En la realización de la parte experimental de la tesis se usan amplificadores de señal basados en amplificadores operacionales ya que son de fácil diseño y económicos.

El objetivo de usar un sumador de nivel de voltaje de cd es darle a la señal analógica los niveles de voltaje adecuados para que el ADC la digitalice de manera adecuada. Los niveles de voltaje de entrada apropiados para el ADC0820 son de 0V como mínimo y 5V como máximo. Sumar un voltaje de cd a una señal se puede hacer de diversas formas, como por ejemplo, con sumadores basados en amplificadores operacionales o usando un divisor de voltaje. En el desarrollo experimental de la tesis se usa una configuración por divisor de voltaje. A continuación se explica la configuración de la etapa de amplificación y adición de voltaje de cd.

2.2.1.1 Amplificación de la señal y adición de voltaje de cd

El circuito de la figura 2.2 muestra un amplificador operacional en configuración no inversora seguido de un sumador de nivel de cd mediante divisor de voltaje.

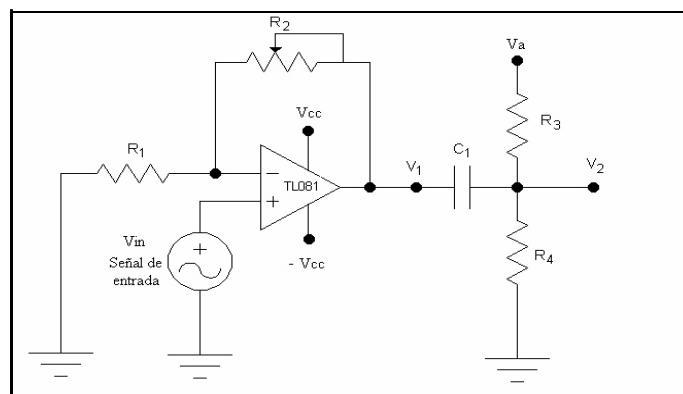


Figura 2.2 Amplificador de señal y sumador de voltaje de cd

Este circuito amplifica la señal de entrada entregando un voltaje V_1 a un sumador de voltaje de cd. Éste divide el voltaje V_a por medio de las resistencias R_3 y R_4 . El voltaje en la resistencia R_4 es el voltaje sumado al voltaje V_1 .

El voltaje V_1 está dado por la siguiente ecuación:

$$V_1 = V_{in} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (2.1)$$

donde: V_{in} = voltaje de entrada.

V_1 = voltaje de salida del amplificador.

V_{cc} = voltaje de alimentación.

R_1 = resistencia 1.

R_2 = resistencia de retroalimentación.

El voltaje de salida V_2 está dado por la siguiente ecuación:

$$V_2 = V_1 + \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) (V_a) \quad (2.2)$$

donde: V_2 = voltaje de salida.

V_1 = voltaje de salida del amplificador.

V_a = voltaje de alimentación.

R_3 = resistencia 1 del divisor de voltaje.

R_4 = resistencia 2 del divisor de voltaje.

Los amplificadores de señal y los sumadores de nivel de voltaje de cd acondicionan una señal analógica para que pueda ser inyectada a un ADC. En la siguiente sección se describe el proceso de conversión de una señal analógica a una señal digital.

2.2.2 Conversión de una señal analógica a señal digital

El proceso de conversión de una señal analógica a una señal digital consta de tres partes importantes: el muestreo de la señal analógica, cuantización de las muestras y la codificación de las muestras. Estos tres procesos se describen a continuación.

2.2.2.1 Muestreo

El muestreo es el proceso de tomar el valor instantáneo de la señal analógica a digitalizar cada determinado tiempo [10]. La frecuencia de muestreo se escoge de acuerdo al teorema de Nyquist, el cual establece que la frecuencia mínima de muestreo (f_s) debe ser el doble de la frecuencia máxima de la señal de entrada analógica (f_a). Si f_a es mayor que $2f_s$ habrá distorsión en la señal analógica recuperada. Entonces tenemos que la mínima frecuencia de muestreo es [17]:

$$f_s \geq 2 f_a \quad (2.3)$$

donde f_s = frecuencia mínima de muestreo de Nyquist (Hertz)

f_a = máxima frecuencia que se debe muestrear (Hertz)

El periodo de muestreo es el tiempo transcurrido entre cada proceso de muestreo de la señal y está dado por [13]:

$$T_s = \frac{1}{f_s} \quad (2.4)$$

donde T_s = periodo de muestreo

f_a = frecuencia mínima de muestreo de Nyquist (Hertz)

Generalmente aunado al proceso de muestreo se encuentra el de retención. Este proceso es usado para mantener el valor de la muestra el tiempo necesario para que ésta sea cuantizada [10]. En la figura 2.3 se muestra una señal sinusoidal a la cual se le aplica un proceso de muestreo y retención.

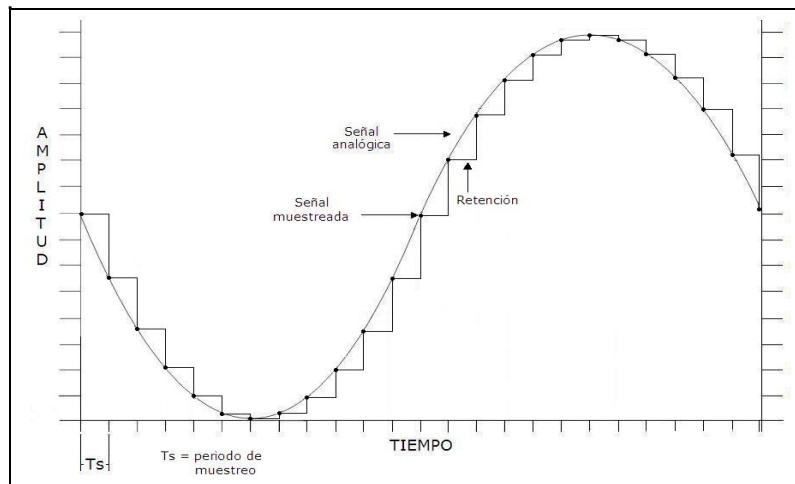


Figura 2.3 Señal sinusoidal a la que se le ha aplicado un proceso de muestreo y retención

La señal puede tomar cualquier valor dentro del rango de amplitud de la señal muestreada, este hecho hace necesario el proceso de cuantización de la señal que se explica a continuación.

2.2.2.2 Cuantización

La cuantización es el proceso de limitar o convertir el rango continuo de valores que las muestras pueden tener a un número limitado de valores discretos [6]. El número de valores permitidos depende directamente del número de salidas o de bits con los que se vayan a representar las muestras.

Entonces tenemos que el número de valores permitidos está dado por [10]:

$$N = 2^n \quad (2.5)$$

donde N = número de valores discretos permitidos

n = número de salidas o de bits para representar las muestras

La señal cuantizada sólo toma valores en los niveles permitidos, esto genera un error llamado ruido de cuantización y se puede reducir aumentando el número de niveles permitidos para la señal digital. En la figura 2.4 se muestra una señal sinusoidal cuantizada, en este caso el número de niveles permitidos es de 16.

2.2.2.3 Codificación

La codificación dentro del proceso de conversión de una señal analógica a una señal digital se refiere a la asignación de un código o número binario a cada una de las muestras cuantizadas anteriormente [10]. En la figura 2.4 se muestra la asignación del código a cada nivel de cuantización usando 4 bits.

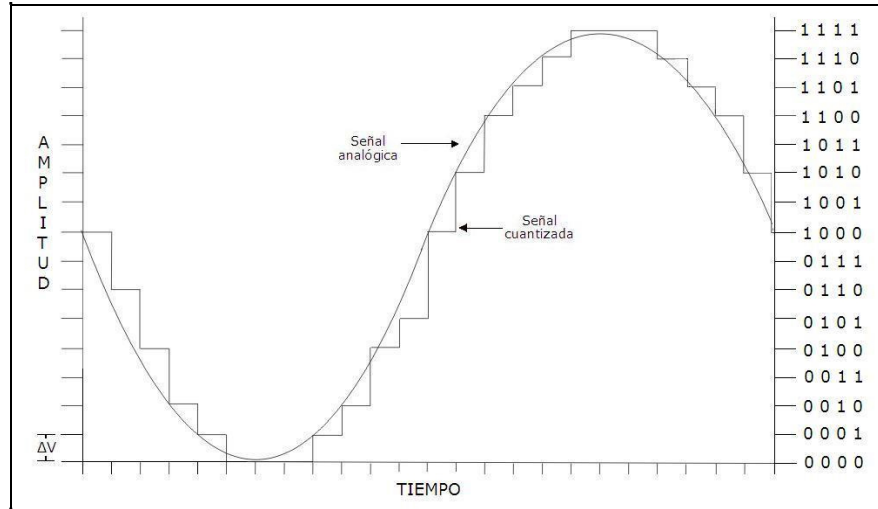


Figura 2.4 Señal cuantizada codificada a 4 bits

La salida de esta etapa es en forma paralela, es decir, se obtiene la señal de las n líneas de salida del ADC simultáneamente.

El ADC usado en la parte experimental de la tesis es el ADC0820. Este ADC implementa los tres procesos descritos anteriormente entregando una salida paralela de 8 bits. En la tabla 2.1 se muestra una comparación con algunos ADC disponibles en el mercado.

ADC	Tiempo de conversión	Salida
ADC0820	1.5 μ s	8 bits paralela
AD670	10 μ s	8 bits paralela
ADC0800	50 μ s	8 bits paralela
ADC0804	100 μ s	8 bits paralela

Tabla 2.1 Comparación de algunos ADC

Se elige del ADC0820 debido a que tiene un menor tiempo de conversión y porque se disponía del dispositivo al momento de diseñar el circuito electrónico para la implementación del sistema. En la figura 2.5 se muestra un diagrama a bloques del ADC0820 [URL 4].

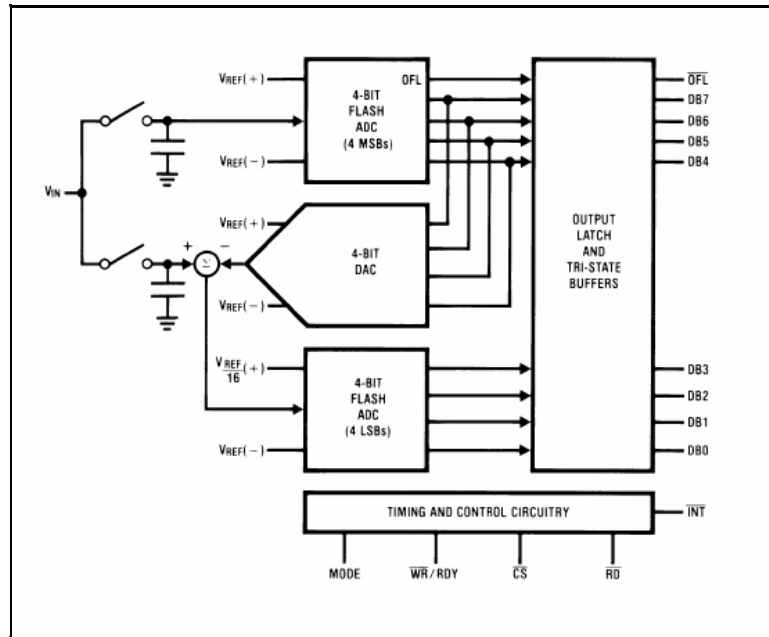


Figura 2.5 Diagrama a bloques del ADC0820

El ADC0820 utiliza la técnica de “half flash” para convertir la señal analógica a digital. Esta técnica consiste en obtener el código de salida por medio de la combinación de resultados de dos ADC internos de menor resolución [URL 12].

El ADC0820 usa dos ADC de 4 bits para obtener una salida paralela de 8 bits. Se toma la señal de entrada, los 4 bits obtenidos del primer ADC son los bits más significativos y están disponibles para transmitirse hacia a los pines de salida. Posteriormente un DAC interno recrea la señal de entrada usando los 4 bits obtenidos del primer ADC. Esta señal analógica es restada de la señal de entrada y la diferencia es convertida por el segundo ADC proporcionando los 4 bits menos significativos. De esta forma se obtiene una salida digital paralela de 8 bits.

La información de forma paralela puede ser utilizada para la transmisión de datos a una distancia corta como por ejemplo dentro de una computadora. Sin embargo suele ser poco práctico si se quiere transmitir la información a través de una distancia considerablemente

larga, ya que se necesitarían varias líneas de transmisión para hacerlo. Una forma de solucionar esto es convertir esta señal digital paralela en una señal digital serie. Este proceso se explica en la siguiente sección.

2.2.3 Conversión de una señal digital paralela a una señal digital serie

El proceso de convertir una señal digital paralela a una señal digital serie se puede llevar a cabo con distintos dispositivos electrónicos simples como pueden ser registros de corrimiento o con dispositivos electrónicos más complejos como pueden ser microcontroladores. Sea cual sea el dispositivo usado el objetivo es convertir la señal paralela obtenida del ADC en varias líneas a una señal digital serial para que pueda ser enviada en una sola línea de transmisión. En la figura 2.6 se muestra un diagrama simplificado de un convertidor paralelo-serie de 4 bits.

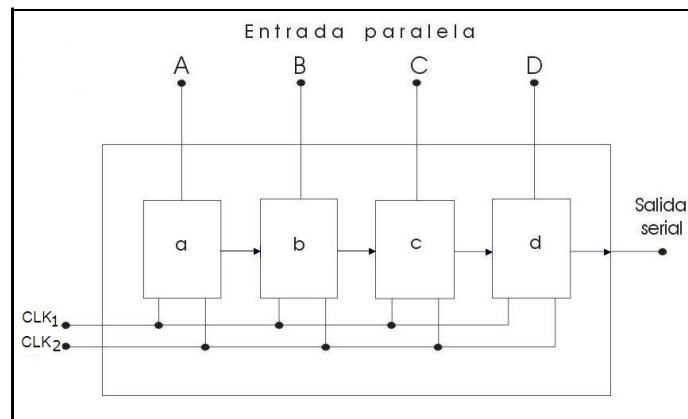


Figura 2.6 Diagrama simplificado de un convertidor paralelo-serie de 4 bits

El procedimiento puede variar un poco dependiendo del dispositivo electrónico usado pero el principio es el mismo. El convertidor paralelo-serie toma la señal en forma paralela directamente del ADC cada determinado tiempo controlado por CLK_1 y lo almacena en un registro de memoria, posteriormente cada determinado tiempo controlado por CLK_2 va enviando los bits almacenados uno a uno hacia la salida en un orden específico. Cuando termina de enviar en forma serial los bits correspondientes a una muestra toma la lectura en paralelo siguiente y el proceso se repite.

El reloj CLK_2 que controla el envío de los bits en forma serial es, en este caso, 4 veces más rápido comparado con el reloj CLK_1 usado para controlar la lectura o carga de los bits en forma paralela. Lo anterior debido a que por cada lectura se envían 4 bits en forma serial.

La señal digital serie de información en este punto es llamada señal PCM. Es posible enviar esta señal a través de una sola línea de transmisión hacia el receptor, en donde, se seguirán varios procesos para recuperar la información. En las secciones siguientes se describen estos procesos.

2.2.4 Conversión de una señal digital serie a una señal digital paralela

En el receptor el proceso de conversión de una señal digital serie a una señal digital paralela se hace porque los convertidores de señal digital a analógica DAC requieren una entrada digital paralela para recuperar la señal de información analógica. Una transformación de una señal digital serie a señal digital paralela se puede realizar con diversos dispositivos electrónicos. Estos dispositivos pueden ser sencillos como registros de corrimiento o más complejos como microcontroladores. Sea cual sea el dispositivo usado el principio es el mismo.

El convertidor serie-paralelo toma un bit de la señal digital serie cada determinado tiempo controlado por CLK_1 y los va almacenando en un dispositivo de memoria en un orden específico. Cuando se ha almacenado una cantidad específica de pulsos se envían hacia las líneas de transmisión paralelas cada determinado tiempo controlado por CLK_2 . Las líneas de transmisión paralelas mantienen esa información hasta que se les envían nuevas señales. En la figura 2.7 se muestra un diagrama simplificado de un convertidor serie-paralelo.

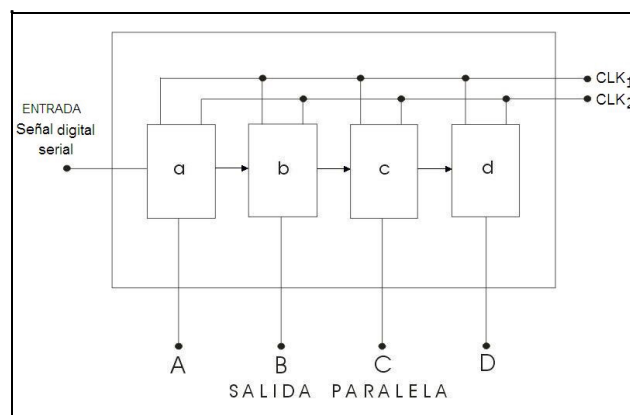


Figura 2.7 Diagrama simplificado de un convertidor serie-paralelo de 4 bits

El reloj CLK_1 el cual controla la captura de los bits en forma serial es, en este caso, 4 veces más rápido comparado con el reloj CLK_2 usado para controlar el envío de los bits hacia la salida. Lo anterior debido a que por cada 4 bits capturados se envía una salida de 4 bits en forma paralela.

Una señal digital paralela es convertida a una señal analógica mediante el proceso que se describe a continuación.

2.2.5 Conversión de una señal digital a señal analógica

La conversión de una señal digital a una señal analógica consiste en representar pulsos digitales en una amplitud analógica. Este proceso es más simple que el proceso de conversión de una señal analógica a digital, mas no por eso menos importante, ya que los procesos derivados directamente de señales analógicas son los que podemos captar con nuestros sentidos. Para realizar este proceso se utilizan convertidores digitales a analógicos (DAC).

La mayoría de los DAC disponibles en el mercado, funcionan bajo el mismo principio de convertir mediante un arreglo resistivo la entrada digital paralela a una salida de corriente proporcional al valor binario de la entrada. En la figura 2.8 se muestra el diagrama a bloques de un convertidor digital a analógico básico.

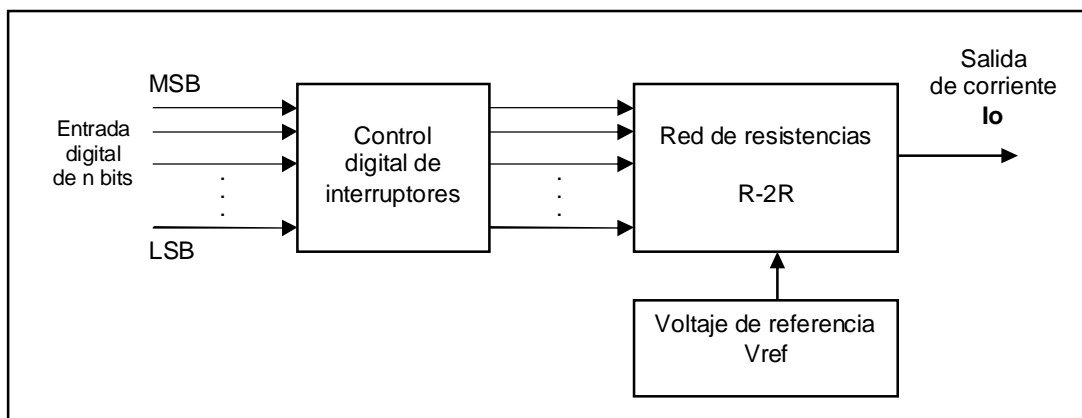


Figura 2.8 Diagrama a bloques de un convertidor digital a analógico básico

El convertidor de señal digital a analógica usado en el desarrollo de la tesis es el DAC0800 de National Semiconductor [URL5]. La decisión de usar el DAC0800 se tomó debido a que se disponía del dispositivo en el momento de diseñar el sistema electrónico para

la implementación del proyecto. En la figura 2.9 se muestra un diagrama a bloques del DAC0800 [URL 5].

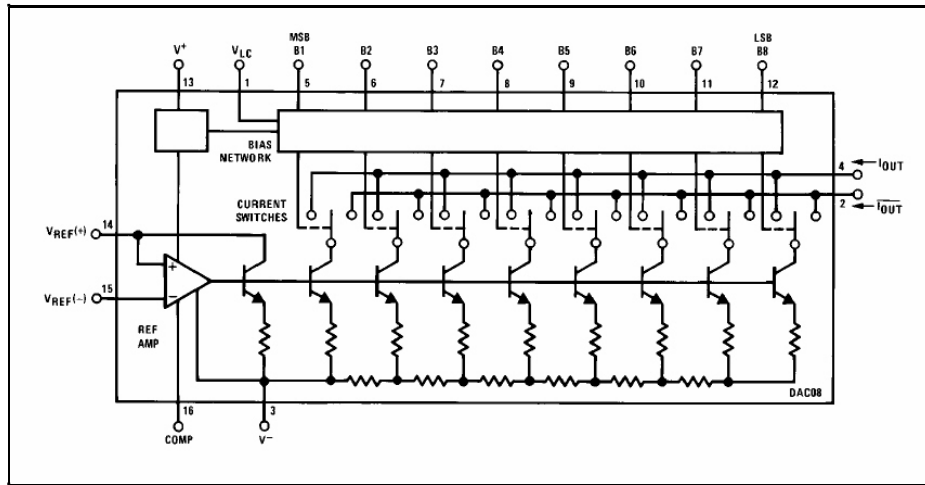


Figura 2.9 Diagrama a bloques del DAC0800

A la salida del convertidor digital a analógico se tiene una señal analógica. Esta señal debe ser filtrada para eliminar señales de ruido y poder recuperar la señal de información analógica. El proceso de filtrado se explica en la siguiente sección.

2.2.6 Filtrado

El proceso de filtrado es necesario debido a que la señal obtenida del DAC contiene componentes de frecuencia no deseados. La frecuencia de corte f_c del filtro depende de la señal analógica de información, es decir, el filtro deberá pasar únicamente componentes de frecuencia que estén dentro del rango de frecuencias de la señal de información [10]. Existe una gran variedad de filtros los cuales pueden ser usados para la realización de este proceso. La decisión de que filtro utilizar depende generalmente de los requerimientos de filtrado así como de la simplicidad y del costo del diseño.

A continuación se describen las características de un filtro pasabajas con respuesta Butterworth y se explica el diseño de un filtro activo de este tipo, ya que debido a su respuesta, bajo costo y fácil diseño es el utilizado en el desarrollo experimental de la tesis.

2.2.6.1 Características de un filtro pasabajas con respuesta Butterworth

El filtro Butterworth también es llamado filtro de máximo plano o filtro plano-plano [2]. Lo anterior debido a que su respuesta en la banda de paso tiende a ser plana. Otra característica importante es que en este tipo de filtros es relativamente fácil lograr que la ganancia en lazo cerrado sea muy cercana a la unidad.

La función de amplitud de un filtro pasabajas con respuesta Butterworth está dada por [8]:

$$|H(j\omega)| = \frac{A}{\sqrt{1 + (\omega/\omega_c)^{2n}}} \quad (n=1, 2, 3, \dots) \quad (2.6)$$

donde A = amplitud

ω_c = frecuencia angular de corte

n = orden del filtro

En el caso de un filtro pasabajas de segundo orden con frecuencia de corte ω_c rad/s la función de transferencia está dada por [8]:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{K C \omega_c}{s^2 + B \omega_c s + C \omega_c^2} \quad (2.7)$$

donde K = ganancia

ω_c = frecuencia angular de corte

Las constantes B y C son coeficientes de normalización para $\omega_c = 1$. Y sus valores para un filtro Butterworth de segundo orden son: $B = 1.4142$ y $C = 1.0$ [8].

En la siguiente sección se explica el diseño de un filtro pasabajas con respuesta Butterworth de segundo orden.

2.2.6.2 Diseño de un filtro pasabajas con respuesta Butterworth

La figura 2.10 muestra un filtro de segundo orden pasabajas. El circuito es conocido como filtro VCVS (voltaje-controlled voltage source) [8].

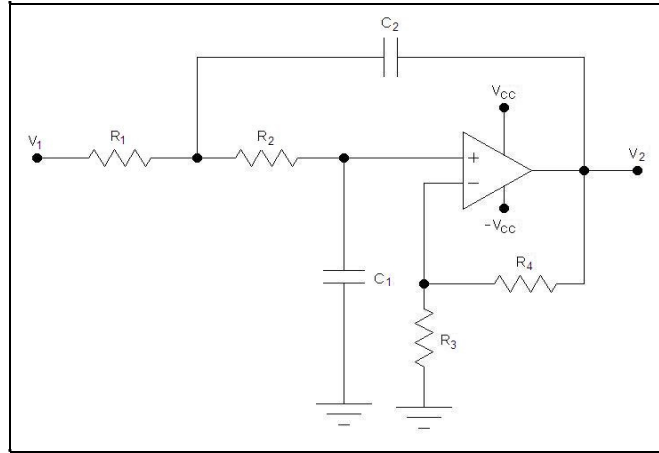


Figura 2.10 Filtro VCVS pasabajas de segundo orden

El circuito desarrolla la función pasabajas de segundo orden descrita en la ec. 2.7 en base a [8]:

$$C\omega_c^2 = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \quad (2.8)$$

$$B\omega_c = \frac{1}{C_2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) + \frac{1}{R_2 C_1} (1 - \mu) \quad (2.9)$$

$$K, \mu = 1 + \frac{R_4}{R_3} \quad (2.10)$$

donde B, C - coeficientes de normalización

ω_c = frecuencia de corte

K, μ - ganancia

Los valores de resistencias para satisfacer las ecuaciones anteriores están dados por [8]:

$$R_1 = \frac{2}{\left[BC_2 + \sqrt{B^2 + 4C(K-1)} \right] C_2^2 - 4CC_1 C_2} \omega_c \quad (2.11)$$

$$R_2 = \frac{1}{CC_1C_2R_1\omega_c^2} \quad (2.12)$$

$$R_3 = \frac{K(R_1 + R_2)}{K - 1} \quad (2.13)$$

$$R_4 = K(R_1 + R_2) \quad (2.14)$$

Los valores de C_1 y C_2 son arbitrarios aunque para que el filtro tenga un mejor desempeño los valores de C_2 deben ser cercanos a $10/f_c \mu\text{F}$ y para asegurar un valor de R_1 real C_1 debe de satisfacer [8]:

$$C_1 \leq \frac{[B^2 + 4C(K - 1)]C_2}{4C} \quad (2.15)$$

Si se desea obtener un valor de ganancia $K=1$ entonces se debe cumplir: $R_3 = \infty$ y $R_4=0$.

En este caso el VCVS es un seguidor de voltaje, es decir, en la banda de paso del filtro el voltaje de entrada será igual que el voltaje de salida.

Con el proceso de filtrado se finaliza la recuperación de la señal analógica.

Capítulo 3

Elementos de un enlace de telecomunicaciones inalámbrico óptico

3.1 Introducción

En este capítulo se explica el funcionamiento general de un enlace de telecomunicaciones inalámbrico óptico punto a punto así como las características principales de los elementos ópticos, electro-ópticos y optoelectrónicos que lo conforman.

También se explica el funcionamiento de un enlace de telecomunicaciones inalámbrico óptico punto a multipunto; se describe la propuesta teórica llamada “Demultiplexor optoelectrónico”, la cual permite la distribución de una señal óptica hacia múltiples puntos de detección. Se definen los elementos que conforman dicha propuesta. Estos elementos son la pantalla de cristal líquido, un sistema óptico y un sistema electrónico de control.

3.2 Elementos de un enlace inalámbrico óptico punto a punto

En la figura 3.1 se muestra un diagrama a bloques de un sistema de telecomunicación inalámbrico óptico punto a punto.

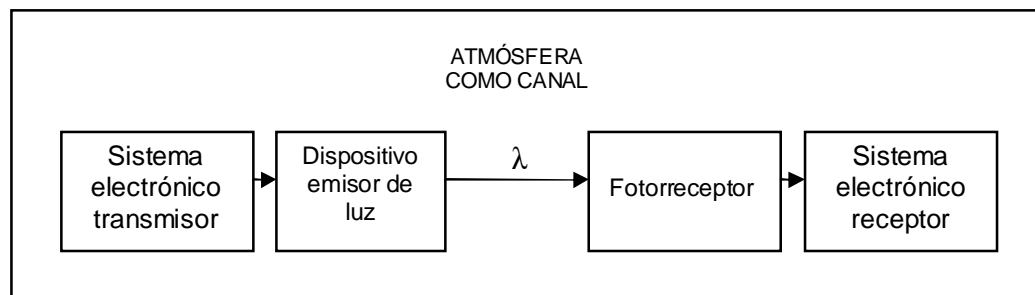


Figura 3.1 Diagrama a bloques simplificado de un enlace de telecomunicaciones inalámbrico óptico punto a punto

Un sistema electrónico genera una señal electrónica de información. Esta información modula en amplitud a un dispositivo emisor de luz, el cual genera una portadora luminosa con longitud de onda λ . La señal luminosa es transmitida a través de la atmósfera hacia el receptor, en donde, mediante un fotodiodo es transformada en una señal eléctrica, la cual es procesada por un sistema electrónico que recupera la señal de información.

A continuación se explican las características más importantes de los dispositivos emisores de luz y de los dispositivos fotodetectores, los cuales son los elementos electro-ópticos y optoelectrónicos en un el enlace de telecomunicación inalámbrico óptico punto a punto.

3.2.1 Emisores de luz

Como se ha mencionado un emisor de luz, en un sistema de telecomunicaciones inalámbrico óptico, es un dispositivo que se encarga de enviar la señal de información óptica a través de la atmósfera hacia el receptor. Actualmente los dispositivos más usados para realizar esta función son los diodos láser (DL) y los diodos emisores de luz (LED), la elección del dispositivo a usar depende directamente de las características del sistema a implementar. A continuación se describen las características de rendimiento más importantes de los emisores de luz.

3.2.1.1 Principales características de rendimiento de los emisores de luz

Longitud de onda pico

Es la longitud de onda a la cual el emisor de luz concentra la mayor parte de potencia. En la figura 3.2 se muestra la longitud de onda pico.

Ancho espectral

Idealmente un emisor de luz usado para comunicaciones debería de emitir luz en una sola longitud de onda, pero en la práctica la luz es emitida en un rango centrado en la longitud de onda pico. El ancho espectral se define como la diferencia en longitud de onda entre los dos puntos en que la potencia de la señal ha caído hasta un 50%. En la figura 3.2 se muestra el ancho espectral de un emisor de luz.

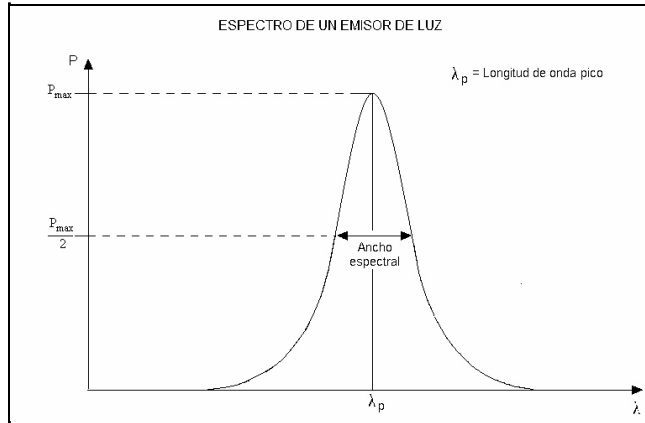


Figura 3.2 Espectro de un emisor de luz

Potencia

Es la potencia de la energía óptica de salida del emisor de luz. Este parámetro es de suma importancia ya que de éste depende la distancia máxima del enlace óptico.

Tiempo de respuesta

El tiempo de respuesta es el tiempo que tarda el emisor de luz en responder ante un cambio en la señal de entrada eléctrica. Usualmente se toman como puntos de transición el 10% y el 90% de la potencia máxima de la señal. Esta característica es una de las más importantes ya que determina el ancho de banda del emisor de luz y consecuentemente del sistema en general. En la figura 3.3 se muestra el tiempo de respuesta de subida y de bajada de un emisor de luz.

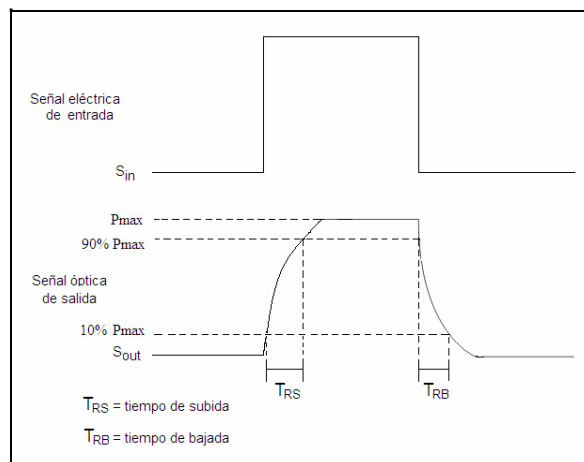


Figura 3.3 Tiempo de respuesta de un emisor de luz

A continuación se describen las características del diodo láser ya que es el dispositivo más utilizado en comunicaciones ópticas inalámbricas.

3.2.1.2 Características de el diodo láser (DL)

La palabra LASER es el acrónimo en inglés para Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. El diodo láser es ampliamente usado en comunicaciones ópticas ya que tiene características muy ventajosas para esta aplicación, por ejemplo:

El diodo láser es capaz de emitir luz monocromática, es decir, los fotones generados tienen una longitud de onda muy cercana. Además la luz es emitida preferentemente en una sola dirección.

Los diodos láser pueden ser excitados por una baja potencia de energía eléctrica lo que hace posible su manejo con circuitos sencillos basados en transistores [19].

Son eficientes al convertir energía eléctrica en energía óptica. Su eficiencia está por arriba del 50% [19].

Su manufactura está basada en tecnología de semiconductores lo cual permite su producción masiva.

3.2.2 Fotodetectores

La función principal de un fotodetector, dentro de un sistema de comunicación óptica, es la de transformar la energía radiante de la señal óptica proveniente del emisor de luz en energía eléctrica, para que pueda ser recuperada la señal de información.

Principalmente los fotodetectores se pueden clasificar en dos grupos: detectores térmicos y detectores de fotones [3].

Los detectores térmicos absorben la radiación provocando un incremento de temperatura en el material irradiado, este incremento de temperatura provoca una variación de las propiedades eléctricas del detector.

En el segundo tipo de fotodetectores los fotones son absorbidos por el semiconductor causando una excitación de electrones dentro del material, con lo cual es observada una señal eléctrica de salida, dicho en otras palabras, este tipo de fotodetectores convierten fotones en electrones. Los fotodetectores de este tipo son los que se usan dentro de los sistemas de comunicación óptica y se basan en el fenómeno físico llamado efecto fotoeléctrico. Si el

electrón generado es emitido fuera del material el dispositivo es llamado fotoemisivo o basado en el efecto fotoeléctrico externo. Si no existe la emisión pero en su lugar un par electrón-hueco está disponible para permitir la circulación de corriente en un circuito externo entonces el dispositivo está basado en el efecto fotoeléctrico interno [4].

El fotodiodo PIN y el fotodiodo de avalancha funcionan bajo el principio del efecto fotoeléctrico interno y son los más usados dentro de los sistemas de comunicación óptica.

3.2.2.1 Fotodiodo PIN

El fotodiodo PIN está formado por tres capas, una capa de material tipo n, una intrínseca y una de material tipo p. Los fotones inciden en la capa intrínseca generando pares electrón-hueco. El fotodiodo PIN se polariza inversamente para que el campo eléctrico generado acelere las cargas presentes en la zona intrínseca hacia los electrodos, presentándose una corriente eléctrica.

3.2.2.2 Fotodiodo de avalancha

Los fotodiodos de avalancha son polarizados de manera inversa con voltajes elevados. Este voltaje origina un fuerte campo eléctrico que acelera a los portadores generados por la incidencia de fotones. Estos portadores colisionan con otros átomos del semiconductor generando más pares electrón-hueco. Esta ionización por impacto determina la ganancia de avalancha.

3.2.2.3 Principales características de rendimiento de los fotodetectores

Responsividad

Es una de las características fundamentales de cualquier fotodetector ya que nos indica que tan sensible es a la energía radiante y se define como la magnitud de la señal de salida entre la unidad de señal de entrada. La responsividad está dada por: [3]

$$\mathfrak{R} = \frac{V_s}{P} \quad (3.1)$$

donde: \mathfrak{R} = responsividad

V_s = voltaje de salida del fotodetector

P = potencia recibida por el fotodetector

Si el fotodetector entrega una corriente en la salida entonces la responsividad está dada por:

$$\mathfrak{R} = \frac{A_s}{P} \quad (3.2)$$

donde: \mathfrak{R} = responsividad

A_s = corriente de salida del fotodetector

P = potencia recibida por el fotodetector

Potencia equivalente de ruido

Todos los fotodetectores generan un ruido provocado por diversos factores como la corriente de oscuridad y la temperatura. La mínima potencia detectable depende directamente del nivel de ruido generado por el fotodetector. La potencia equivalente de ruido se define como la mínima potencia radiante requerida para producir una señal de salida igual al nivel de ruido generado por el detector.

Tiempo de respuesta

El tiempo de respuesta es el tiempo necesario para que el fotodetector responda ante un cambio en la señal de entrada irradiante. Usualmente se toman como puntos de transición el 10% y el 90% de la potencia máxima de la señal. Esta característica está directamente relacionada con el ancho de banda en el que puede operar el fotodetector.

Respuesta espectral

La respuesta espectral define como cambia la salida del fotodetector en base a un cambio en la longitud de onda de la señal radiante de entrada para un flujo constante de energía. Se debe poner mucha atención a esta característica al seleccionar el fotodetector a usar en un sistema optoelectrónico, lo más recomendable es que tenga un nivel máximo de respuesta en la longitud de onda a detectar para que se tenga un rendimiento óptimo del

sistema. En la figura 3.4 [URL9] se muestra la respuesta espectral del fotodiodo FDS010 usado en el desarrollo de la tesis.

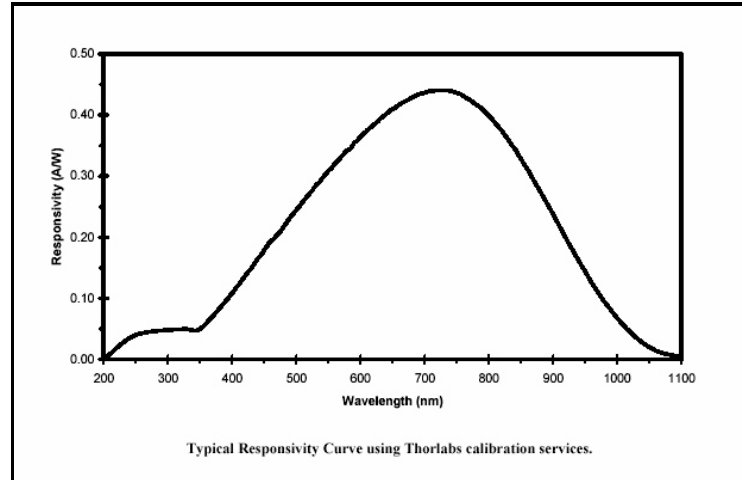


Figura 3.4 Respuesta espectral del fotodiodo FDS010

3.3 Elementos de un sistema inalámbrico óptico punto a multipunto

En la figura 3.5 se muestra un diagrama general de un sistema de telecomunicación inalámbrico óptico punto a multipunto.

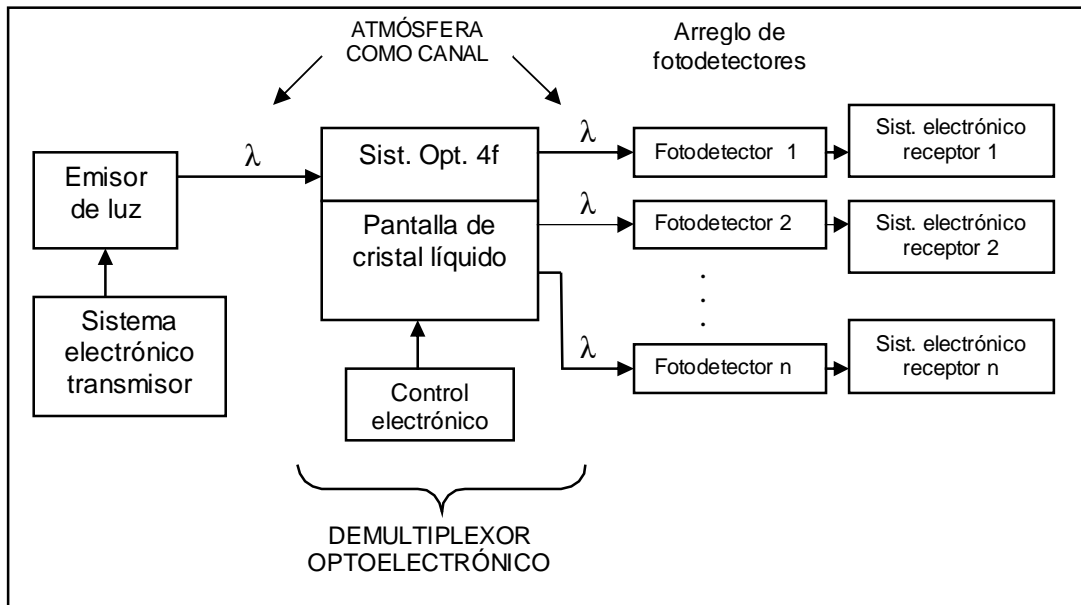


Figura 3.5 Diagrama a bloques simplificado de un enlace de telecomunicaciones inalámbrico óptico punto a multipunto

Un sistema electrónico genera una señal electrónica de información, esta señal modula a una señal portadora óptica generada por un diodo láser semiconductor, la cual es transmitida a través de la atmósfera. En el receptor el demultiplexor optoelectrónico distribuye la señal hacia múltiples puntos. Esta distribución se realiza por medio de un sistema óptico. Dentro de este sistema óptico se encuentra una pantalla de cristal líquido que funciona como modulador espacial de luz dinámico y es controlada por un sistema electrónico. En cada punto de detección ubicado en el plano de Fresnel la señal óptica es transformada nuevamente en una señal electrónica mediante un fotodiodo. Esta señal es procesada por un sistema electrónico para recuperar la señal de información como en el enlace punto a punto.

El sistema de control electrónico manipula el flujo de información hacia cada punto de detección de manera individual. A continuación se explica el funcionamiento del demultiplexor optoelectrónico.

3.3.1 Demultiplexor optoelectrónico

El demultiplexor optoelectrónico es la parte esencial de este enlace. Este dispositivo distribuye de manera directa y controlada la señal óptica de información hacia los múltiples puntos de recepción. En la figura 3.6 se muestra un diagrama del demultiplexor optoelectrónico.

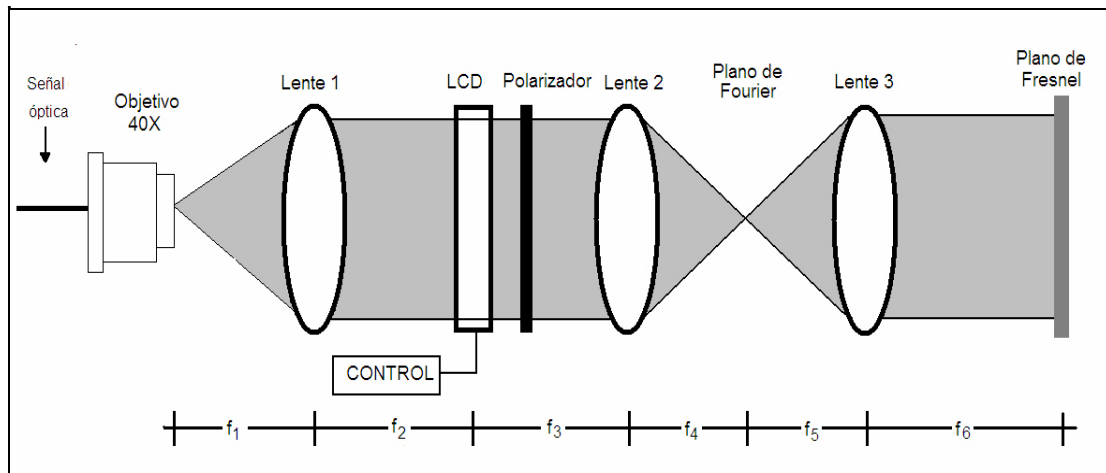


Figura 3.6 Diagrama del demultiplexor optoelectrónico

El demultiplexor optoelectrónico está compuesto por una pantalla de cristal líquido SVGA2VX [18] que funciona como modulador espacial de luz, un sistema óptico y un sistema de control.

3.3.1.1 Pantalla de cristal líquido

La pantalla de cristal líquido (LCD), dentro de un enlace de telecomunicaciones inalámbrico óptico punto a multipunto, es utilizada como un modulador espacial de luz. Un modulador espacial de luz es un dispositivo usado para modular la intensidad, fase o polarización de la luz que pasa a través de él [16]. Los moduladores espaciales de luz basados en cristal líquido muestran algunas características favorables como: fácil control, alta definición y bajo consumo energético.

La modulación espacial de la luz se hace mediante una rejilla bidimensional desplegada en la pantalla de cristal líquido y el sistema óptico. Esta modulación de la señal óptica de información permite distribuirla hacia los múltiples fotodetectores. En la figura 3.7 se muestra una rejilla bidimensional de amplitud.

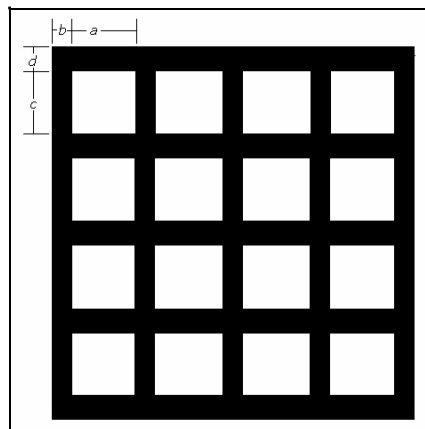


Figura 3.7 Rejilla bidimensional de amplitud

A continuación se explica el funcionamiento del sistema óptico y como junto con la pantalla de cristal líquido distribuyen la información hacia múltiples puntos de detección.

3.3.1.2 Sistema óptico

El sistema óptico está compuesto por un objetivo de microscopio, 3 lentes y un polarizador.

El objetivo de microscopio se usa para expandir el haz luminoso proveniente del transmisor.

La lente 1 está ubicada a una distancia f_1 (distancia focal frontal de la lente 1) del objetivo de microscopio, se usa para colimar el haz y generar una onda plana. Lo anterior se basa en la siguiente ecuación [URL3]:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s''} \quad (3.3)$$

donde: f = distancia focal de la lente.

s = distancia entre el objeto y la lente.

s'' = distancia a la que se forma la imagen.

La onda colimada es modulada espacialmente en amplitud por una rejilla bidimensional desplegada en la pantalla de cristal líquido, la cual está ubicada a una distancia f_2 (distancia focal anterior de la lente 1) de la lente 1. La pantalla de cristal líquido es un dispositivo capaz de modificar sus propiedades ópticas en base a una señal de entrada electrónica proveniente del sistema de control, el cual se explica en la siguiente sección.

La señal óptica modulada por la pantalla de cristal líquido es inyectada a un sistema óptico 4f. Este sistema se usa para formar la imagen de la rejilla bidimensional en el plano de Fresnel. Este sistema está formado por la lente 2 y la lente 3. La lente 2 está ubicada a una distancia f_3 (distancia focal frontal de la lente 2) de la pantalla de cristal líquido y la lente 3 está ubicada a una distancia igual a la suma de f_4 y f_5 (distancia focal anterior de la lente 2 y distancia focal frontal de la lente 3) de la lente 2. La imagen de la rejilla bidimensional desplegada por la pantalla de cristal líquido está ubicada en el plano de Fresnel a una distancia f_6 (distancia focal anterior de la lente 3) de la lente 3. Es en el plano de Fresnel donde se ubican los fotodiodos que recuperan la señal óptica de información.

3.3.1.3 Sistema de control electrónico

El sistema de control electrónico consiste en un una PC y un software. Este sistema establece las dimensiones de l8a rejilla y controla el flujo de la señal óptica hacia los puntos de recepción, obscureciendo independientemente cada elemento de la rejilla bidimensional. Lo anterior ocasiona que la luz incidente en la pantalla de cristal líquido sea bloqueada para esos elementos en particular y los fotorreceptores asociados no reciban la señal óptica de información. El sistema de control puede conectar y desconectar cada elemento de la rejilla en cualquier momento. De esta manera se tiene un interruptor optoelectrónico por cada elemento de la rejilla bidimensional de amplitud. En la figura 3.8 se muestra un diagrama del sistema de control electrónico.

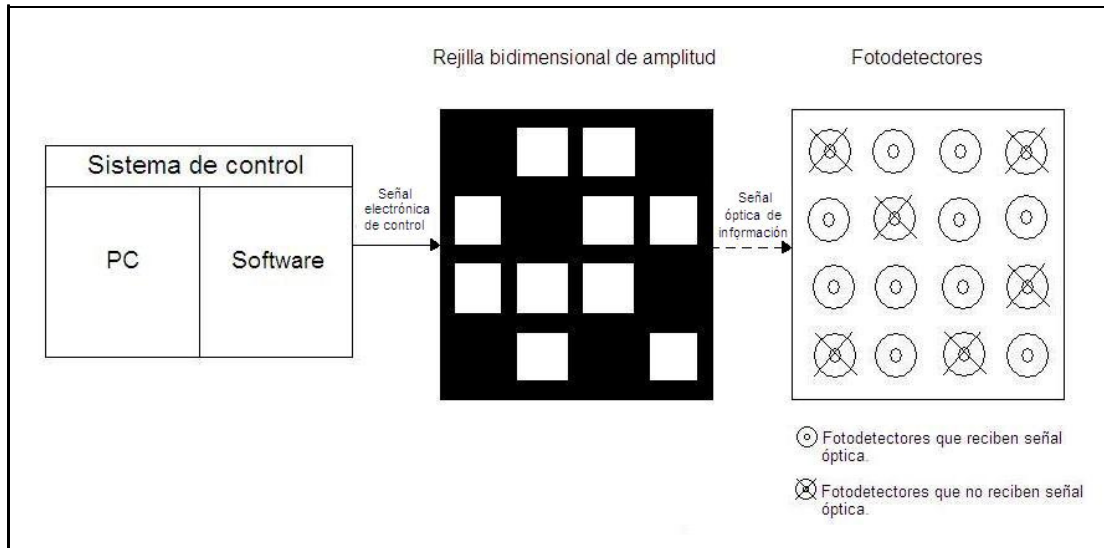


Figura 3.8 Sistema de control electrónico

Capítulo 4

Integración del enlace inalámbrico óptico punto a punto y comprobación experimental de un enlace inalámbrico óptico punto a multipunto

4.1 Introducción

Se propone el diseño y construcción de un enlace de telecomunicación inalámbrico óptico punto a punto. Una señal analógica de información es digitalizada por medio de un convertidor analógico digital (DAC), este dispositivo entrega una señal digital paralela de 8 bits, posteriormente un microcontrolador convierte la señal digital paralela a una señal PCM. Un modulador electro-óptico modula en amplitud a un diodo láser semiconductor usando la señal PCM como modulante. El diodo láser envía la señal de información óptica hacia el receptor a través de la atmósfera. En el receptor la señal de información óptica es recuperada mediante un fotodiodo el cual transforma la señal óptica en una señal electrónica, esta señal es la información PCM, después un microcontrolador la procesa y la convierte a una señal digital paralela para que sea convertida nuevamente a una señal analógica usando un DAC y un filtro activo pasabajas.

Se comprueba experimentalmente un enlace de telecomunicación inalámbrico óptico punto a multipunto. El transmisor es el mismo utilizado en el enlace punto a punto, en el receptor la señal óptica de información transmitida es procesada por el demultiplexor optoelectrónico. Dentro de este dispositivo un sistema óptico y una pantalla de cristal líquido modulan espacialmente en amplitud la señal luminosa mediante una rejilla bidimensional desplegada por la pantalla de cristal líquido, esto con la finalidad de que la señal óptica pueda ser recuperada en múltiples puntos. En cada uno de estos puntos se recupera la señal óptica de información mediante un receptor como el usado en el enlace punto a punto. Un sistema de

control se encarga de manipular el flujo de información hacia los diferentes puntos, pudiendo conectar y desconectar la señal de cualquier punto en particular.

4.2 Integración del enlace inalámbrico óptico punto a punto

En la figura 4.1 se muestra un diagrama a bloques del enlace inalámbrico óptico punto a punto.

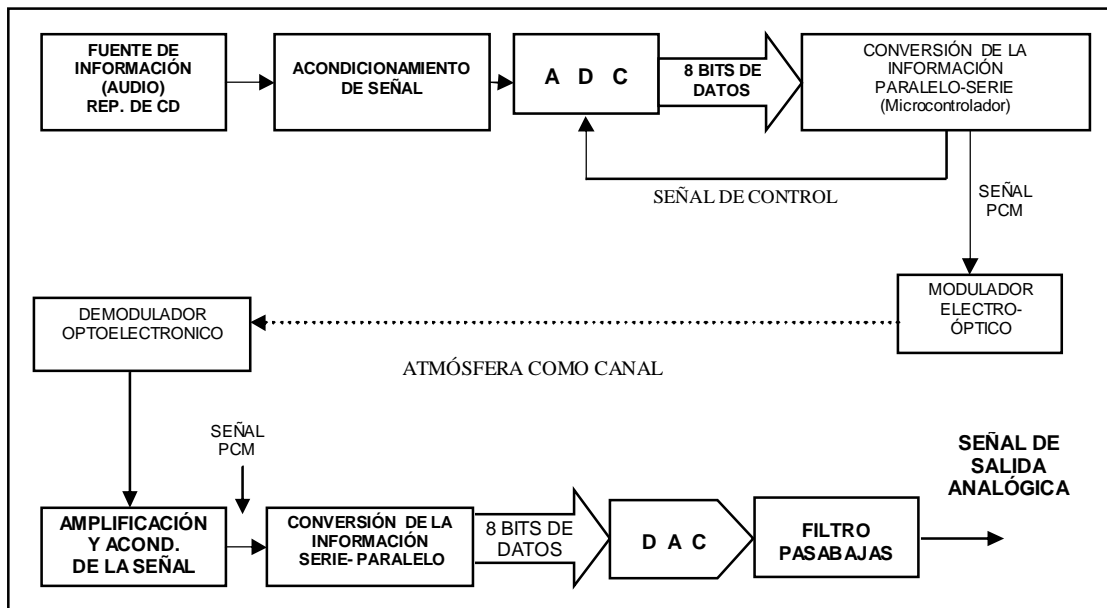


Figura 4.1. Diagrama a bloques del enlace de telecomunicación inalámbrico óptico punto a punto

La señal óptica generada es transmitida hacia el receptor una distancia de 26 m a través de la atmósfera. Esta distancia se alcanza por medio de 8 reflexiones mediante espejos montados en una mesa holográfica.

En la siguiente sección se explica de forma detallada el funcionamiento tanto del transmisor como del receptor

4.2.1 Transmisor

El transmisor es la parte del sistema que se encarga de procesar la señal de información, transformarla a una señal óptica y enviarla hacia el receptor a través de la atmósfera. En la figura 4.2 se muestra el diagrama a bloques del transmisor.

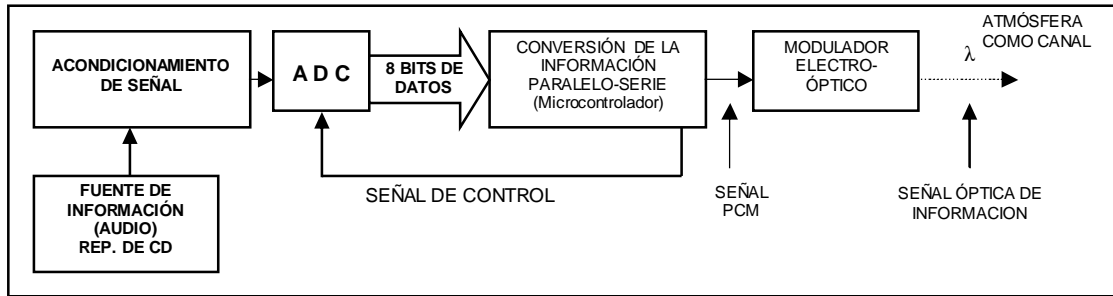


Figura 4.2. Diagrama a bloques del transmisor

A continuación se describe cada una de las partes que integran al transmisor.

4.2.1.1 Fuente de información

La señal analógica de información es obtenida de un reproductor de CD/MP3 portátil marca SONY. La información también puede ser obtenida de cualquier fuente de audio como por ejemplo: señal de salida de un mini componente, de la tarjeta de audio de una computadora o de un micrófono.

4.2.1.2 Acondicionamiento de la señal previa a la digitalización

La señal de información analógica (audio), que se obtiene en este caso del reproductor de discos compactos, tiene una amplitud de aproximadamente 2V y no tiene nivel de voltaje de cd. En esta etapa lo que se busca es amplificar la señal de información y sumarle un nivel de voltaje de cd para que pueda ser digitalizada de manera adecuada por el ADC. En la figura 4.3 se muestra el diagrama del acondicionamiento de señal.

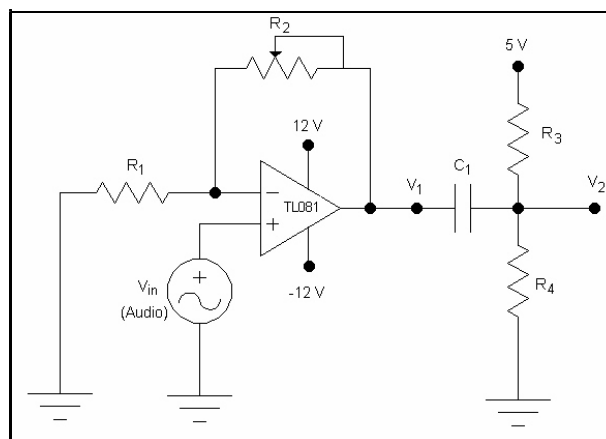


Figura 4.3 Diagrama esquemático del bloque de acondicionamiento de señal

Se requiere una señal con una amplitud de 5V, con niveles mínimos de voltaje de 0V y máximos de 5V. Para esto se utiliza un amplificador operacional en una configuración no inversora con una ganancia de lazo cerrado $A = 2.5$ y posteriormente se le suma un nivel de cd de 2.5V.

La ganancia de lazo cerrado del amplificador inversor está dado por:

$$A_c = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (4.1)$$

Las resistencias usadas en el circuito son de $R_1=5.6 \text{ K}\Omega$ y $R_2=20 \text{ K}\Omega$ variable. Al utilizar una resistencia variable se puede fijar el valor de ésta a $8.4 \text{ K}\Omega$ para ajustar la ganancia $A=2.5$:

$$A_c = 1 + \frac{8.4\text{K}\Omega}{5.6\text{K}\Omega} = 2.5$$

el voltaje de salida V_1 está dado por la siguiente ecuación:

$$V_1 = V_{in} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (4.2)$$

entonces se tiene que:

$$V_1 = (2V)(2.5) = 5V$$

De esta manera el voltaje V_1 tiene una amplitud máxima de 5V. El nivel de voltaje mínimo es de -2.5V y el nivel de voltaje máximo es de 2.5V.

El sumador de nivel de cd opera mediante un divisor de voltaje entre R_3 que tiene un valor de $1 \text{ K}\Omega$ y R_4 que tiene un valor de $1 \text{ K}\Omega$. Entonces de acuerdo a la ec. 2.2 se tiene:

$$V_2 = V_{in} + \left(\frac{R_4(V_a)}{R_3 + R_4} \right)$$

$$V_2 = V_{in} \left(\frac{(1K\Omega)(5V)}{1K\Omega + 1K\Omega} \right)$$

$$V_2 = V_{in} + 2.5V$$

De esta manera el voltaje sumado a V_{in} es igual a 2.5V. Entonces se tiene a la salida del sumador un voltaje de salida V_2 con niveles mínimos de voltaje de 0V y máximos de 5V, los cuales son los requeridos por el ADC para digitalizar la señal. A continuación se describe el proceso de digitalización de la señal.

4.2.1.3 Digitalización de la señal de información

Como se explicó en el capítulo 2 el proceso de digitalización consta de tres procesos: muestreo, cuantización y codificación. El ADC usado es el ADC0820 de National Semiconductor el cual realiza estos tres procesos.

Antes de diseñar esta etapa se establece que el rango de frecuencias a digitalizar es desde 0 Hz hasta 15000 Hz. En base a esto se calcula la frecuencia mínima de muestreo de Nyquist f_s por medio de la ec. 2.3 de la siguiente manera:

$$f_s \geq 2 f_a \geq 2 (15\ 000) \geq 30\ 000$$

Basándose en pruebas experimentales se eligió una frecuencia de muestreo de 40000 muestras/segundo para el desarrollo de la tesis. Las pruebas realizadas demostraron la recuperación de todas las frecuencias entre 0 Hz y 15000 Hz con mayor exactitud que al utilizar la frecuencia mínima de muestreo de Nyquist. Teniendo este parámetro establecido el proceso de digitalización se lleva a cabo de la siguiente manera.

El ADC0820 se hace funcionar en el modo *WR then RD*. En este modo de operación el ADC empieza a convertir con un pulso en bajo en el pin WR, este pulso debe tener una duración de por lo menos 600 ns. El dato está disponible en la salida 600 ns después de que el pulso inyectado al pin WR cambia a alto [URL4]. En la figura 4.4 se muestran las características establecidas para el pulso inyectado al pin WR y el tiempo necesario para tener disponible la señal digital paralela de salida.

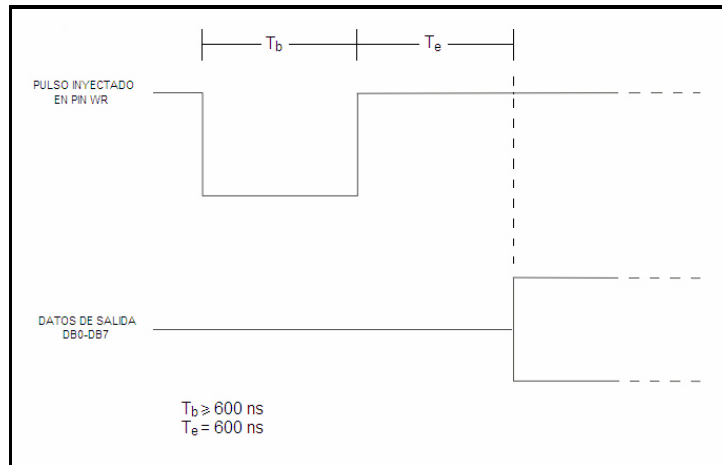


Figura 4.4 Diagrama de tiempos del modo *WR then RD* del ADC usado

El pulso usado para controlar al ADC es generado por un microcontrolador AT90S2313 [URL1] de Atmel. Este pulso tiene un periodo $T_c = 25 \mu\text{s}$, con un tiempo en bajo $T_b = 0.83 \mu\text{s}$ y un tiempo en alto $T_a = 24.17 \mu\text{s}$. Estos tiempos cumplen con los requisitos establecidos por el fabricante para el funcionamiento del ADC en el modo *WR then RD* y sus valores específicos dependen directamente de la estructura del programa implementado en el microcontrolador.

La señal de control establece una frecuencia de muestreo de 40000 muestras/segundo. En la figura 4.5 se muestran las características de la señal de control S_c inyectada al pin WR del ADC.

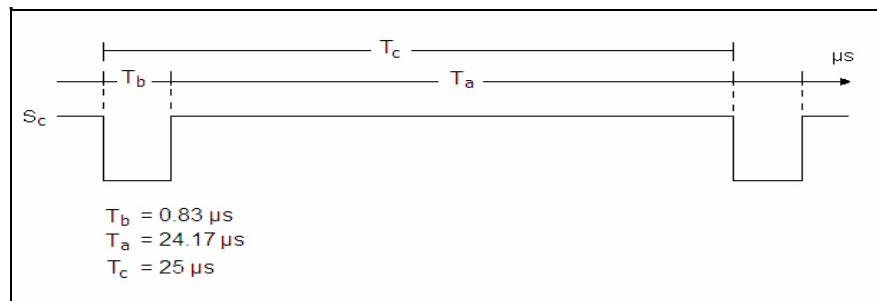


Figura 4.5 Señal de control inyectada al ADC

El microcontrolador además de controlar las conversiones se encarga de convertir la señal digital paralela entregada por el ADC a una señal PCM, este proceso se describe a continuación.

4.2.1.4 Conversión de señal digital paralela a señal digital serie

El proceso de conversión de la señal digital paralela a señal digital serie, como ya se mencionó, es realizado por el mismo microcontrolador que genera la señal de control para las conversiones del ADC. Para realizar estas dos tareas los pines del microcontrolador se configuran de la siguiente manera.

El puerto B (pin 12 - pin 19) del microcontrolador es configurado como entrada, en este puerto se inyectará la señal paralela de 8 bits proveniente del ADC.

El pin PD1 (pin 3) es configurado como salida y es utilizado para transmitir la señal de control hacia el ADC.

El pin PD0 (pin 2) es configurado como salida y es utilizado para transmitir la señal PCM hacia el modulador electro-óptico.

El microcontrolador realiza la conversión de la señal digital paralela a PCM de acuerdo al siguiente algoritmo:

- 1.- Genera el pulso de control para el ADC en el pin PD1.
- 2.- Lee el dato disponible a través del puerto B almacenándolo en una variable “dato”.
- 3.- temp=8
- 4.- Genera un bit de inicio en alto en el pin PD0.
- 5.- Se hace un corrimiento a la derecha a dato y se evalúa la bandera de “carry”. Si es igual a 0 se genera un bit en bajo y si es igual a 1 se genera un bit en alto en PD0.
- 6.- temp= temp-1
- 7.- Si temp <> 0 ir al paso 5, si temp=0 se genera un bit de paro en bajo.
- 8.- Ir al paso 1.

En el apéndice C se muestra el programa que implementa este algoritmo en el microcontrolador.

De esta manera se tiene en el pin PD0 la salida digital serial con un bit de inicio en alto, ocho bits de información y un bit de paro en bajo.

En la figura 4.6 se muestra un diagrama de tiempos de las operaciones y las señales generadas por el microcontrolador.

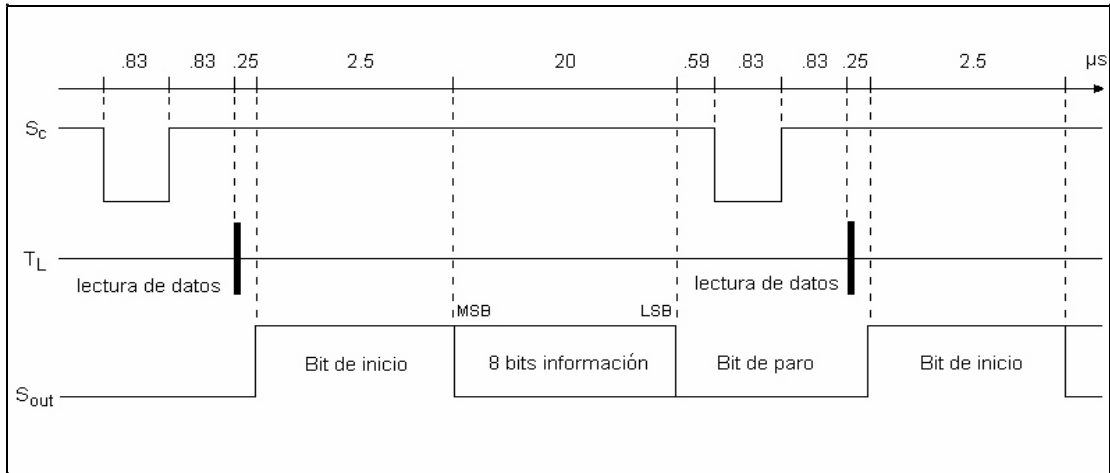


Figura 4.6 Diagrama de tiempos de las operaciones y señales generadas por el microcontrolador

S_c es la señal generada por el microcontrolador para controlar las conversiones del ADC. Tiene un periodo de 25 μs . Esta salida está disponible en el pin PD1.

T_L indica el tiempo en que son tomados los valores de entrada provenientes del ADC en el puerto B del microcontrolador.

S_{out} es la señal de salida digital serial de información. Esta señal está disponible en el pin PD0 y es inyectada al modulador electro-óptico.

Como se observa en el diagrama el tiempo de bit es de 2.5 μs . En base a esto se tiene una tasa de transferencia de 400000 bps. El ancho de banda necesario para enviar esta información con la técnica de modulación en amplitud para señales digitales (ASK) está dado por [13]:

$$B = 2 * R_b \tag{4.3}$$

donde B = ancho de banda requerido

R_b = tasa de transferencia de bits

En base a la ec. 4.3 se tiene que el ancho de banda necesario para enviar una señal de 400000 bps es de 800000 Hz.

4.2.1.5 Modulador electro-óptico

El modulador electro-óptico se encarga de modificar la corriente que circula a través del diodo láser semiconductor en función de la señal PCM de entrada proveniente del microcontrolador. En la figura 4.7 se muestra el diagrama del modulador electro-óptico.

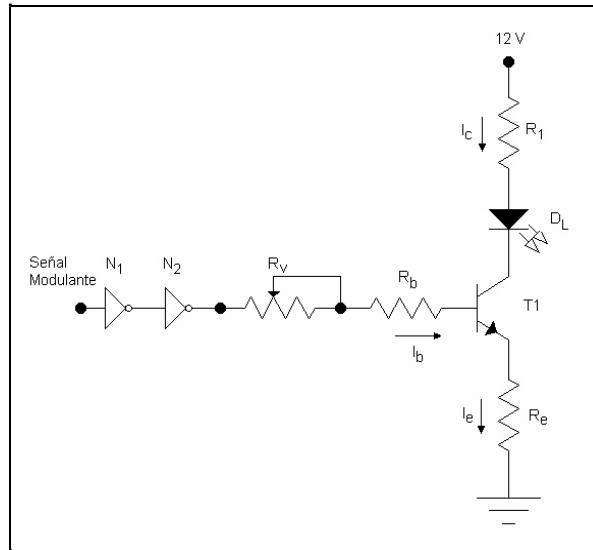


Figura 4.7 Diagrama del modulador electro-óptico

El circuito funciona de la siguiente manera: la señal modulante es inyectada a dos compuertas lógicas inversoras (NOT) en cascada las cuales sirven para eliminar ruido en la señal. Cuando la señal modulante tiene un nivel alto (5V) circulará una corriente I_b por la base del transistor. Esta corriente polariza al transistor provocando que circule una corriente I_c a través del diodo láser y éste emita señal luminosa. Cuando la señal modulante tiene un nivel bajo (0V) el transistor no es polarizado y el diodo láser no emite ninguna señal. De esta manera el diodo láser es modulado en amplitud.

El apéndice D contiene el proceso de diseño del modulador electro-óptico. Los componentes usados en el circuito se muestran en la tabla 4.1.

Componentes usados	
T1	2N2222A [URL8]
D_L	DL7147-201
N_1, N_2	74LS04 [URL7]
R_b	8.2K Ω
R_v	5K Ω (variable)
R_1	27 Ω
R_e	5.6 Ω
I_c	100 mA

Tabla 4.1 Valores de componentes usados en el circuito del modulador electro-óptico

A continuación se muestran algunas características del diodo láser semiconductor usado.

4.2.1.6 Diodo láser semiconductor

El modelo del diodo láser semiconductor es el DL7147-201 [URL10]. En la tabla 4.2 se enlistan algunas de sus características dadas por el fabricante.

Diodo láser semiconductor DL7147 – 201	
Longitud de onda (λ)	Típica: 658 nm
	Máxima: 662 nm
Potencia señal continua	60 mW
Potencia señal pulsante	100 mW
Corriente de umbral (min.)	40 mA
Corriente de operación (min.)	90 mA
Voltaje de operación (min)	2.5 V

Tabla 4.2 Características del diodo láser semiconductor

La figura 4.8 muestra la curva característica del diodo láser semiconductor.

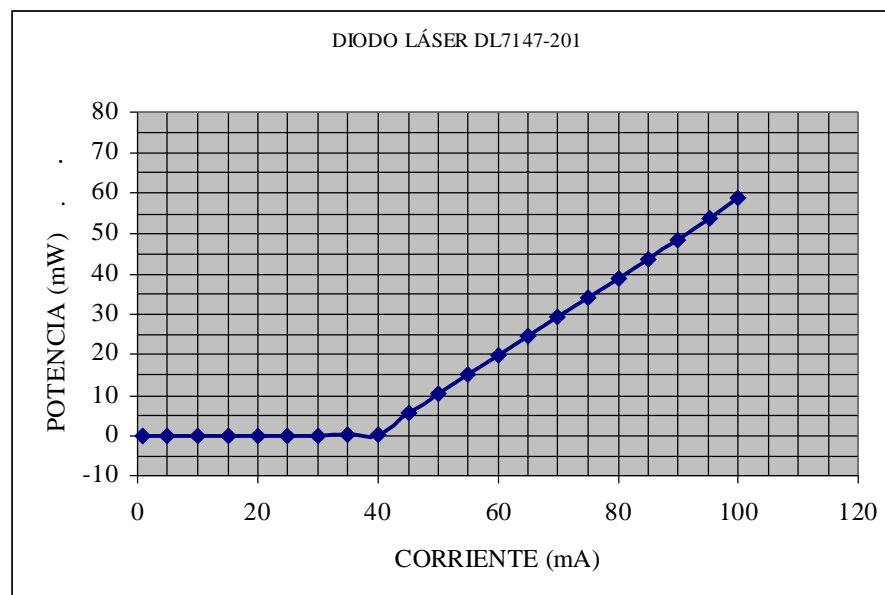
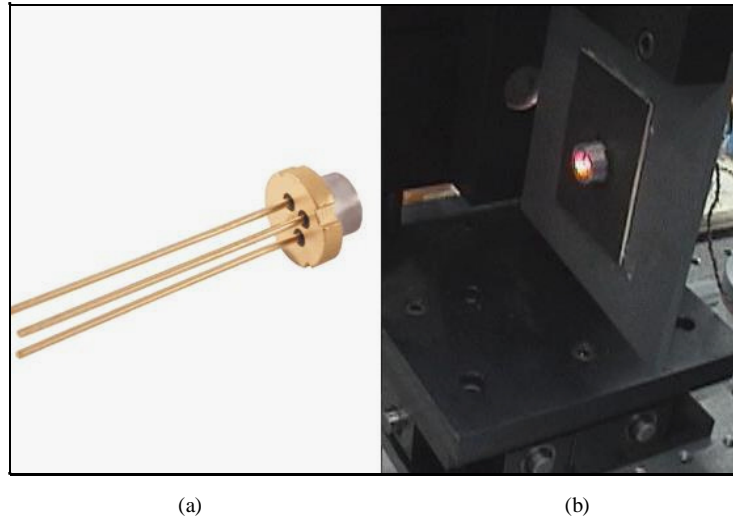


Figura 4.8 Curva característica del diodo láser semiconductor DL7147-201

En la fotografía 4.1 a) se muestra el diodo láser semiconductor usado. En la fotografía 4.1 b) se muestra el diodo láser semiconductor dentro de un tubo de colimación montado en un sistema que permite posicionarlo.



Fotografía 4.1 Diodo láser semiconductor DL7147-201

4.2.2 Receptor

El receptor es el encargado de convertir la señal óptica generada en el transmisor a una señal electrónica, procesarla y recuperar la señal analógica de información. En la figura 4.9 se muestra el diagrama a bloques del receptor.

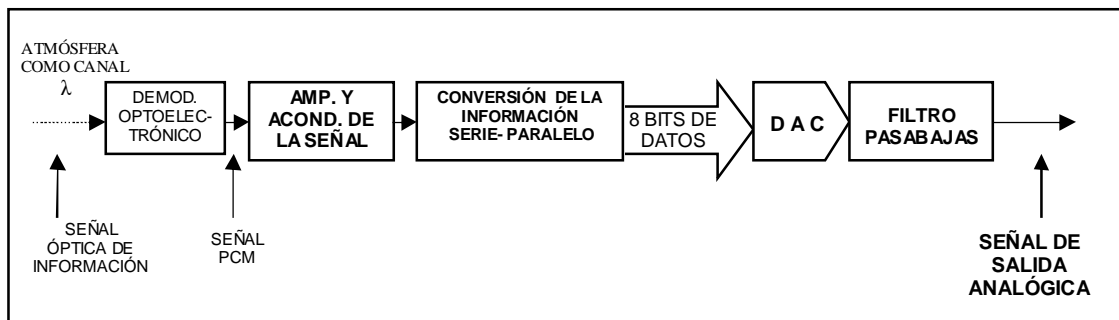


Figura 4.9 Diagrama a bloques del receptor

A continuación se explican cada una de las partes del receptor.

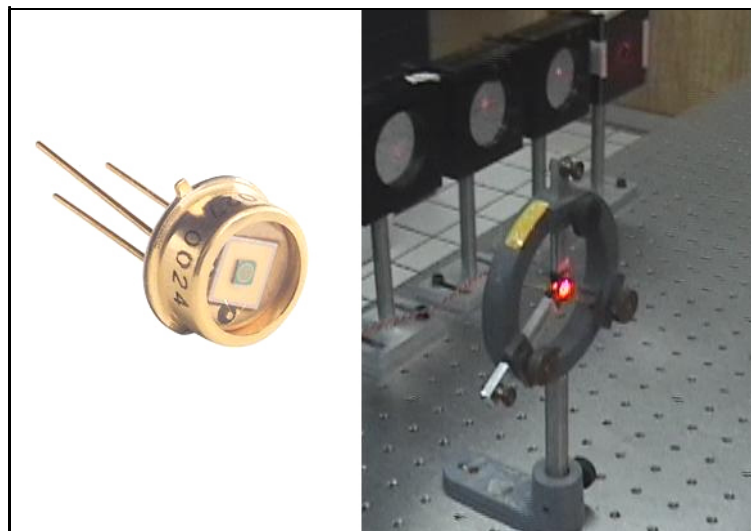
4.2.2.1 Fotodiodo PIN

El fotorreceptor usado es el fotodiodo FDS010 [URL9] el cual tiene una estructura PIN. Algunas de sus características obtenidas por su fabricante se muestran en la tabla 4.3.

Fotodiodo FDS010	
Respuesta espectral	200 – 1100 nm
Área activa	0.8 mm ²
Tiempo de subida (RL=50 Ω)	< 1 ns (20V bias)
Tiempo de bajada (RL=50 Ω)	< 1 ns (20V bias)
Corriente de oscuridad	2.5 nA max. (20 V)
Responsividad máxima a 658 nm.	0.42 A / W

Tabla 4.3 Características del fotodiodo usado

En la fotografía 4.2 se muestra el fotodiodo pin usado.



Fotografía 4.2 Fotodiodo pin FDS010

4.2.2.2 Demodulador optoelectrónico

El demodulador optoelectrónico convierte la señal óptica a una señal eléctrica mediante el fotodiodo descrito anteriormente. En la figura 4.10 se muestra el diagrama del demodulador optoelectrónico.

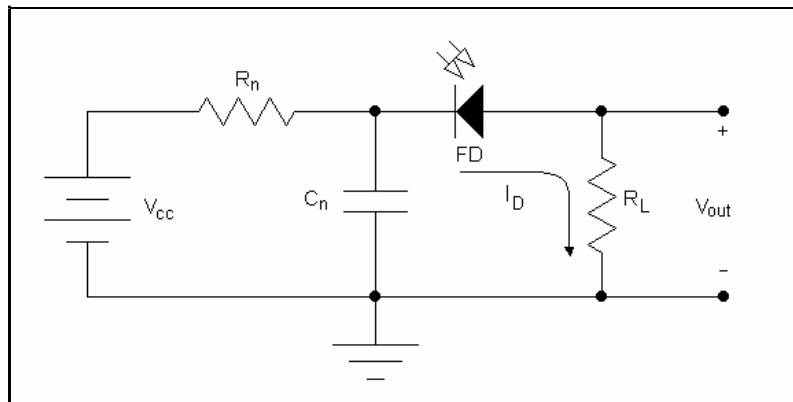


Figura 4.10 Diagrama del demodulador optoelectrónico

La resistencia R_n y el capacitor C_n se usa como un filtro de ruido. El fotodiodo FD convierte la señal óptica de información en una corriente eléctrica I_D . Esta corriente circula a través de la resistencia de carga R_L obteniendo un voltaje proporcional.

El voltaje de salida de V_{out} está dado por: [URL9]

$$V_{out} = P * R(\lambda) * R_L \quad (4.3)$$

donde: P = potencia óptica recibida

$R(\lambda)$ = responsividad a una longitud de onda específica

R_L = resistencia de carga

La potencia óptica recibida es aproximadamente de 1.7 mW y la responsividad del fotodiodo es de 0.42 para una longitud de onda de 658 nm. [URL9]. La resistencia de carga R_L tiene un valor de 4.7K Ω . Entonces se calcula el valor de V_{out} .

$$V_{out} = 1.6\text{mW} * 0.42\text{A/W} * 4.7\text{K}\Omega = 3.1\text{V}$$

Este voltaje tiene que ser amplificado y acondicionado a niveles de lógica transistor-transistor (TTL) para que pueda ser procesado. A continuación se explica este proceso.

4.2.2.3 Acondicionamiento de la señal a niveles TTL

El acondicionamiento de señal a niveles TTL (5V representa un 1 lógico y 0V representa un 0 lógico) se lleva a cabo usando el comparador de voltaje LM311 de National Semiconductor [URL6]. En la figura 4.11 se muestra el diagrama usado.

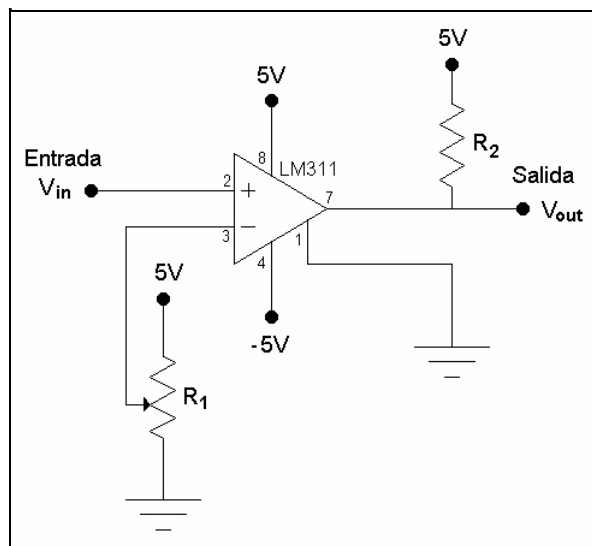
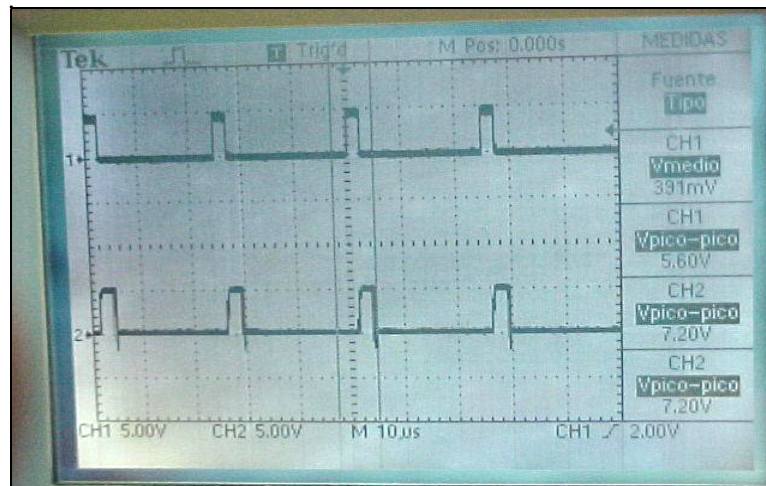


Figura 4.11 Diagrama de la etapa de acondicionamiento de la señal de información a niveles TTL

Este circuito establece un nivel de comparación entre 0V y 5V mediante un divisor de voltaje usando una resistencia variable, el voltaje de comparación es de aproximadamente 2.5V. El circuito entrega una salida de 5V cuando la señal de entrada V_{in} tiene un valor mayor a 2.5V y 0V cuando la señal de entrada V_{in} tiene un valor menor a 2.5V.

Los valores de las resistencias usadas en el circuito son: $R_1 = 5 \text{ K}\Omega$ (variable) y $R_2 = 1 \text{ K}\Omega$.

En la fotografía 4.3 se muestra la señal PCM transmitida al modulador electro-óptico (canal 1) y la señal digital recuperada acondicionada a niveles TTL (canal 2). Las señales muestran un pulso con una frecuencia de 40 KHz. esto es debido a que la entrada analógica es 0V, entonces el único pulso en alto es el bit de inicio que se envía al principio de cada cadena de 8 bits.



Fotografía 4.3 Señal digital transmitida (canal 1) y la señal digital recuperada (canal 2)

La señal digital recuperada es inyectada al microcontrolador para que sea convertida en una señal digital paralela. Este proceso se explica a continuación.

4.2.2.4 Conversión de señal digital serie a señal digital paralela

El proceso de conversión de la señal digital serie a una señal digital paralela es necesario por que el DAC requiere una señal digital paralela para recuperar la señal analógica de información. Para esto se ocupa un microcontrolador AT90S2313 de Atmel. Los pines del microcontrolador se configuran de la siguiente manera:

El pin PD0 (Pin 2) es configurado como entrada y es usado para recibir la señal digital serie de información.

El puerto B (Pin 12- Pin 19) es configurado como salida y es usado para la transmisión de la señal digital paralela hacia el DAC.

El microcontrolador realiza la conversión de señal digital serie a paralela mediante el siguiente algoritmo.

- 1.- Se detecta un cambio de alto a bajo (bit de inicio) en el pin de entrada PD0.
- 2.- Se espera un 1.5 tiempo de bit ($3.75\mu\text{s}$).
- 3.- $\text{temp} = 8$.
- 4.- $\text{carry} = 1$.
- 5.- Se lee la señal de entrada en PD0.

Si es 1 se hace un corrimiento a la variable dato introduciendo el valor del carry (1).

Si es 0. La bandera de carry es puesta a cero y se hace un corrimiento a la variable dato introduciendo el valor del carry (0)

6.- Se espera un tiempo de bit ($2.5\mu s$).

7.- $temp = temp - 1$

8.- Si $temp < 0$ ir al paso 4.

9.- Si $temp = 0$ enviar el dato paralelo de salida al puerto B.

10.- Ir al paso 1.

En el apéndice C se muestra el programa que implementa este algoritmo en el microcontrolador.

En la figura 4.12 se muestra un diagrama que muestra las señales y las variables que intervienen en el proceso de conversión de señal digital serie a señal digital paralela. S_{in} es la señal digital serie de entrada y S_{out} es la señal digital paralela de salida.

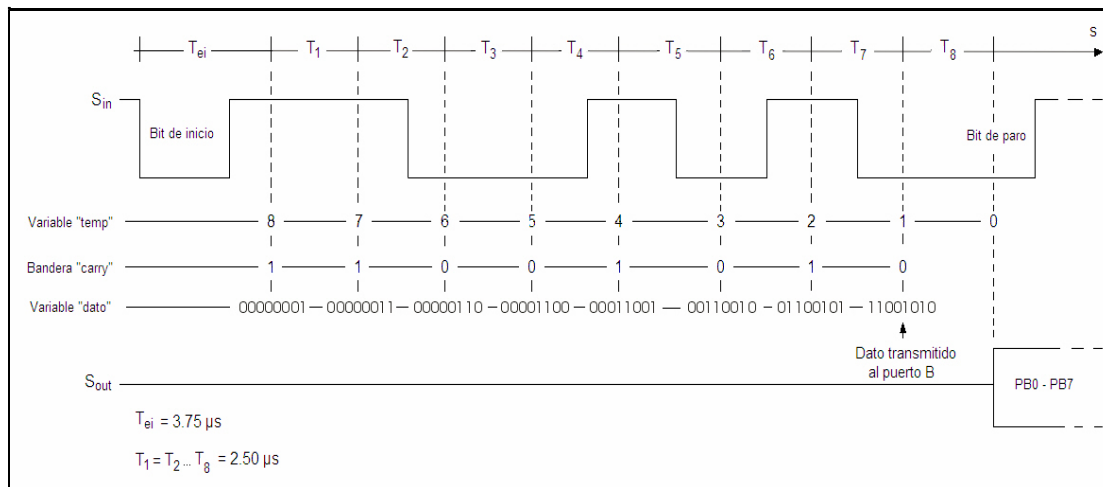


Figura 4.12 Señales y variables en el algoritmo de conversión serie - paralelo

De esta forma se tiene una salida digital paralela a través del puerto B. Esta señal es inyectada al DAC para que la convierta en una señal analógica. Este proceso se explica a continuación.

4.2.2.5 Convertidor digital analógico

El convertidor digital a analógico utilizado es el DAC0800 de National Semiconductor. El cual entrega una salida de corriente proporcional al número binario representado por la entrada digital paralela. Para convertir la corriente de salida en voltaje se usa un amplificador operacional. En la figura 4.13 se muestra el diagrama utilizado.

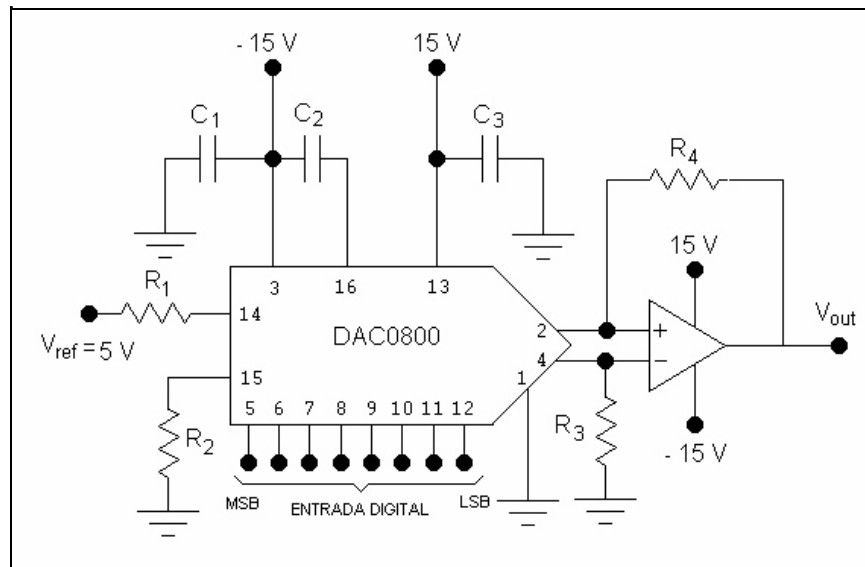


Figura 4.13 Diagrama de la etapa de conversión de señal digital a analógica

Los valores de los componentes son: $R_1=R_2=R_3=R_4=5K\Omega$, $C_1=C_3=0.1\mu F$, $C_2=0.01\mu F$

A la salida de esta etapa se tiene un voltaje analógico V_{out} . Este voltaje necesita ser filtrado debido a que tiene componentes de frecuencia no deseados, para eliminarlos se usa un filtro pasabajas del cual se explica su diseño en la siguiente sección.

4.2.2.6 Filtro pasabajas

El filtro pasabajas usado es un filtro de segundo orden con respuesta Butterworth. La frecuencia de corte es de 15 KHz. El circuito usado es el de la figura 2.14.

El diseño se basa en las ecuaciones expuestas en la sección 2.2.6. Los valores de los coeficientes de normalización B y C son 1.4142 y 1 respectivamente.

Se propone para C_1 y C_2 los valores de $0.00067\mu F$ y $0.005\mu F$.

Aplicando las ecuaciones 2.11 y 2.12 se calculan los valores de las resistencias R_1 y R_2 .

$$R_1 = \frac{2}{\left[BC_2 + \sqrt{B^2 + 4C(K-1)} \right] C_2^2 - 4CC_1C_2} \omega_c = 3.3K\Omega$$

$$R_2 = \frac{1}{CC_1C_2R_1\omega_c^2} = 12.08K\Omega$$

Como se desea obtener una ganancia $K=1$ entonces:

$$R_3 = \infty$$

$$R_4 = 0$$

En la figura 4.14 se muestra el diagrama del filtro.

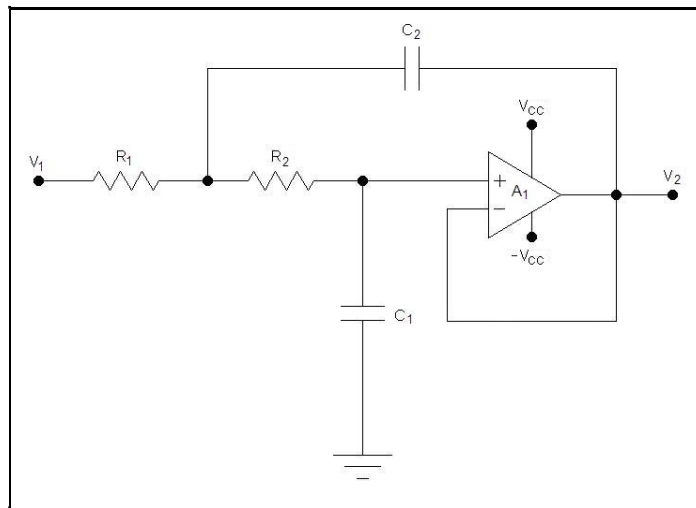


Figura 4.14 Diagrama del filtro implementado

En la tabla 4.4 se muestran los componentes y valores usados para la implementación del filtro.

Componente	Valor
Vcc	12V
A ₁	TL081
R ₁	3.3KΩ
R ₂	12KΩ
C ₁	0.00067μF
C ₂	0.005μF

Tabla 4.4 Componentes usados en la implementación del filtro pasabajas

En la figura 4.15 se muestra la respuesta del filtro.

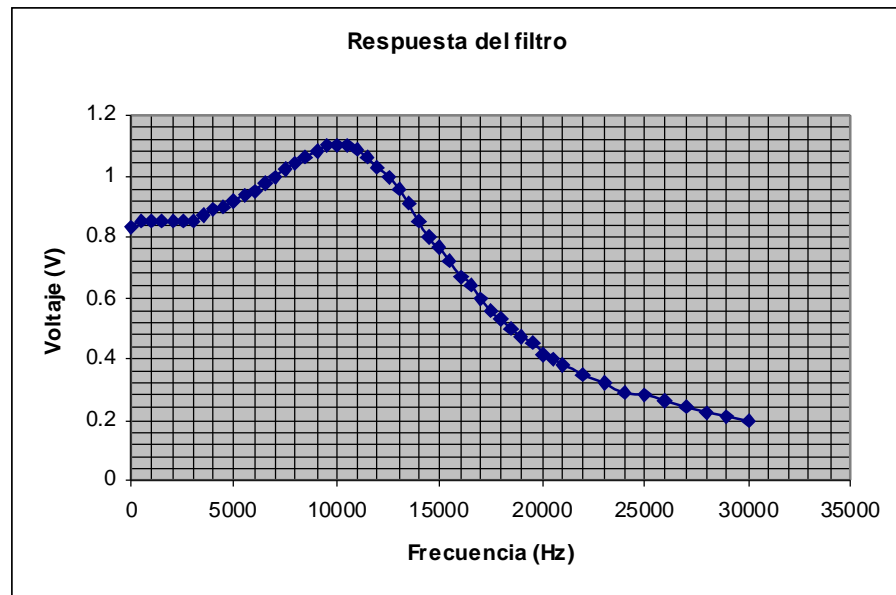


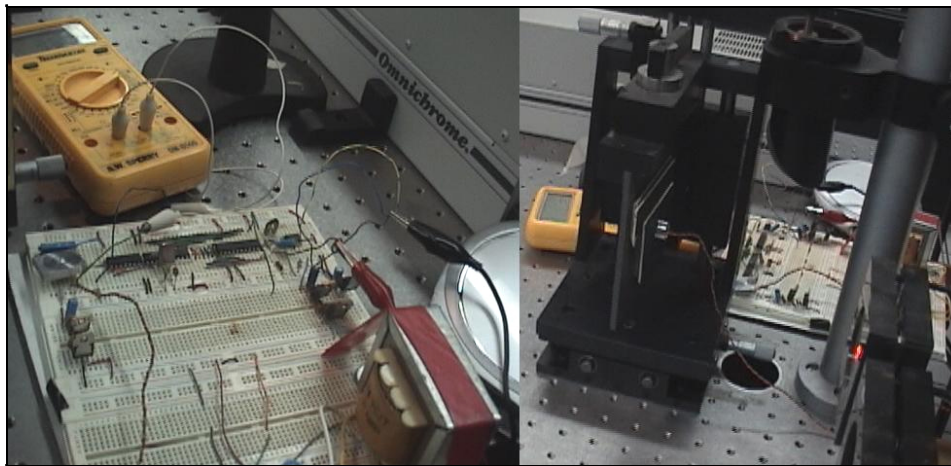
Figura 4.15 Respuesta del filtro implementado

A la salida del filtro se tiene la señal de información analógica.

En el apéndice A se muestra el diagrama esquemático del sistema electrónico transmisor y receptor.

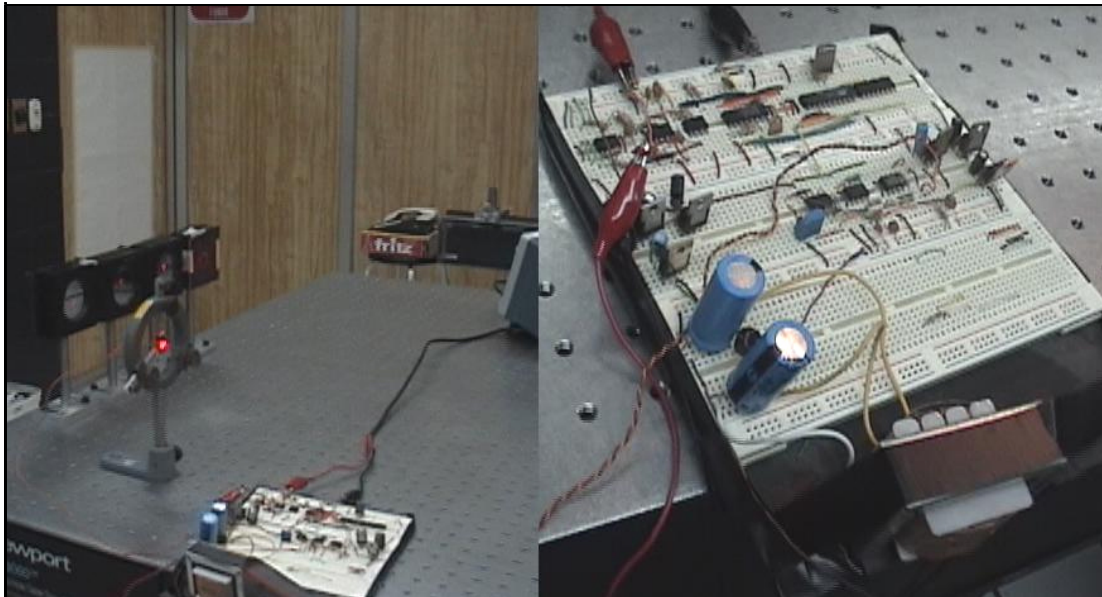
A continuación se muestran fotografías del enlace inalámbrico óptico punto a punto.

En la fotografía 4.4 se muestra el transmisor.



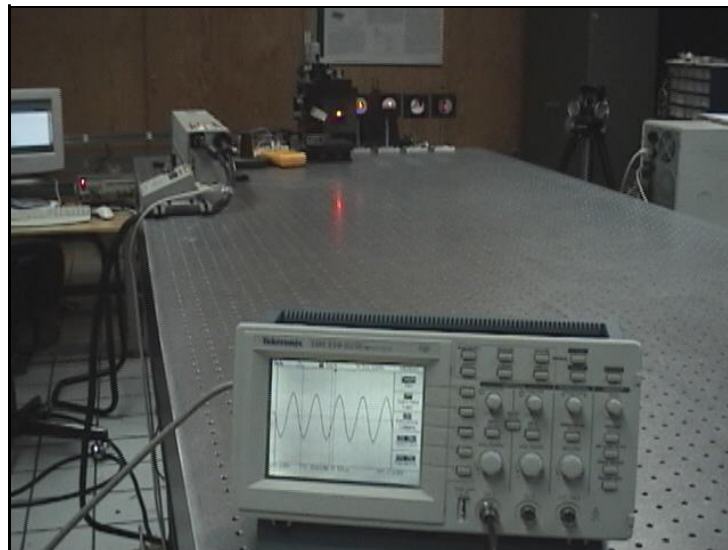
Fotografía 4.4 Sistema transmisor

En la fotografía 4.5 se muestra el sistema receptor.



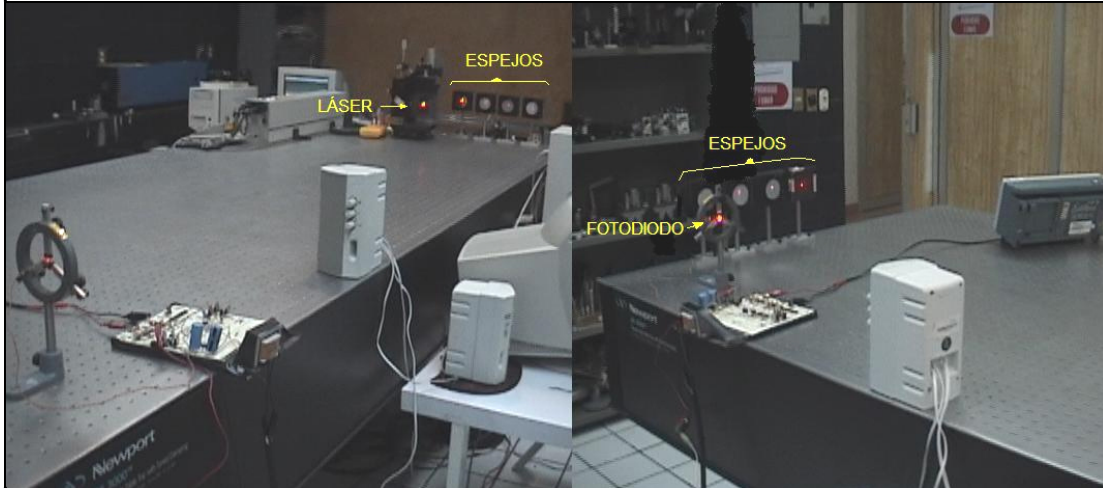
Fotografía 4.5 Sistema receptor

En la fotografía 4.6 y 4.7 se muestra el enlace punto a punto en funcionamiento. En la fotografía 4.6 se puede apreciar en el osciloscopio la señal analógica recuperada.



Fotografía 4.6 Recuperación de la señal analógica de información en el enlace punto a punto

En la fotografía 4.7 se observan los 8 espejos así como la ubicación del diodo láser semiconductor y el fotodiodo.



Fotografía 4.7 Reflexión mediante espejos del haz generado por el diodo láser semiconductor

En la figura 4.16 se muestra la respuesta del enlace. Debido a que a la salida del sistema se encuentra el filtro pasabajas la respuesta del sistema es la misma que la del filtro.

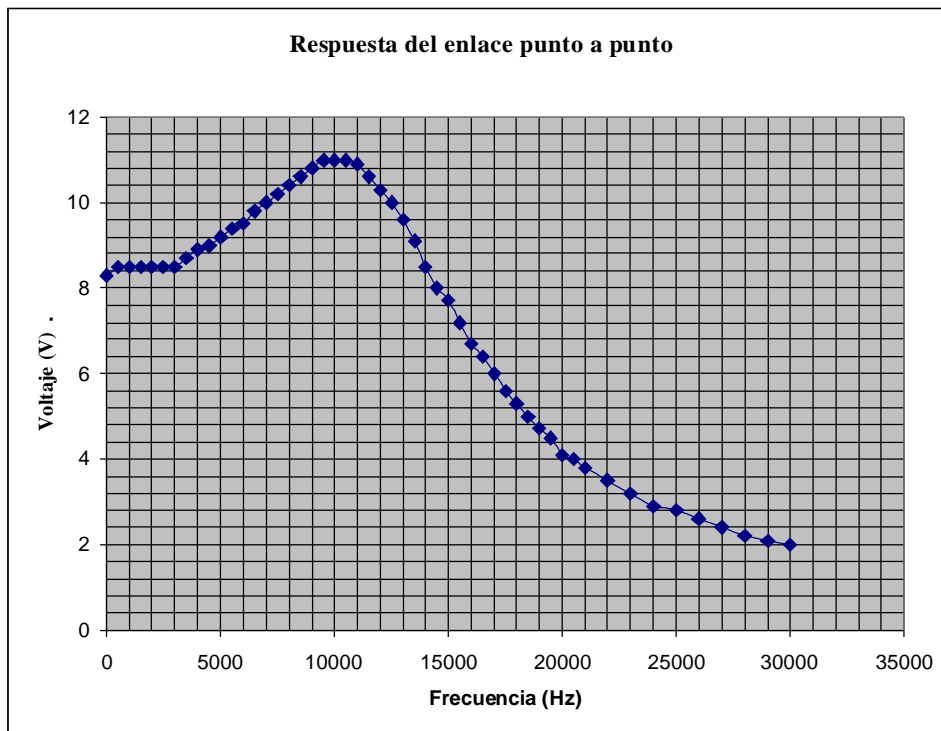


Figura 4.16 Respuesta del enlace punto a punto

En la figura 4.17 se muestra la potencia óptica a través del enlace punto a punto.

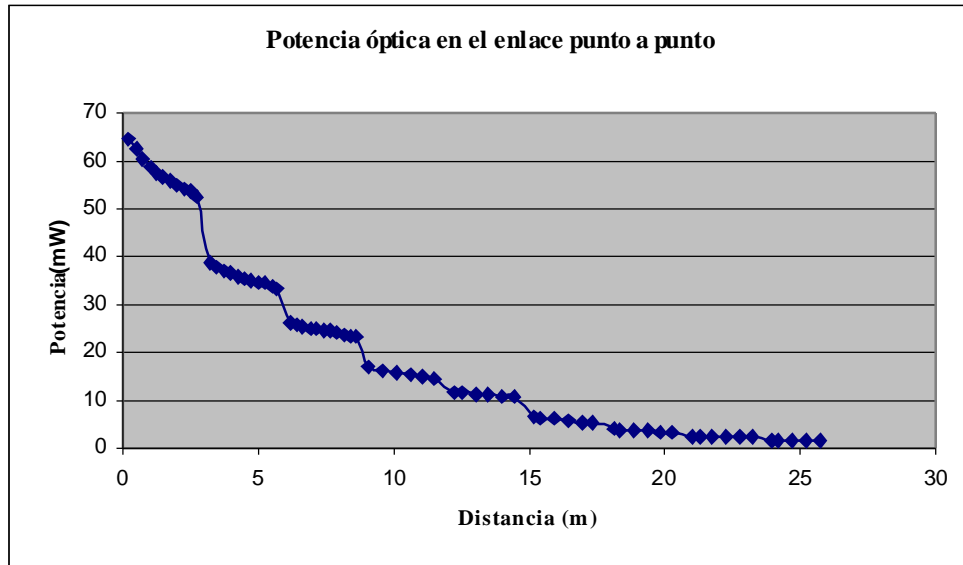


Figura 4.17 Potencia óptica en el enlace punto a punto

Se observa en la gráfica que la distancia máxima alcanzada es de aproximadamente 26 m. La señal óptica recorre esta distancia a través de 8 reflexiones. Con el objetivo de calcular la distancia máxima que tendría el enlace si la señal óptica no fuera atenuada por las reflexiones se hicieron dos aproximaciones. En la figura 4.18 se muestran estas aproximaciones.

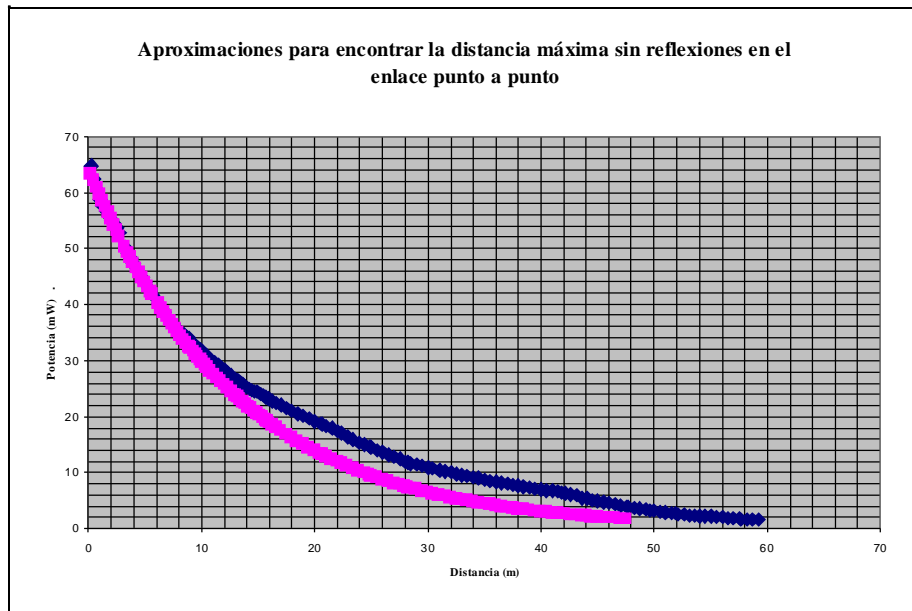


Figura 4.18 Aproximaciones para encontrar la distancia máxima sin reflexiones en el enlace punto a punto

La primera aproximación (línea magenta) muestra que la distancia sin reflexiones sería de 47 m. y se calcula considerando únicamente las once primeras mediciones. La segunda aproximación (línea azul) muestra que la distancia sin reflexiones sería de 59 m. y se calcula considerando todas las mediciones. El cálculo de la distancia máxima para las dos aproximaciones se hizo considerando la mínima potencia óptica detectable por el sistema receptor implementado. Esta potencia es de 1.66 mW y se obtiene de la medición de potencia a la distancia máxima a la que es posible recuperar la señal de información.

Las funciones 4.4 y 4.5 describen la primera y la segunda aproximación respectivamente.

$$P(x) = 64.35 e^{-0.076 x} \quad (4.4)$$

$$P(x) = \begin{cases} 64.35 e^{-0.076 x} & 0.25 \leq x < 6.67 \\ 55.88 e^{-0.056 x} & 6.67 \leq x < 13.4 \\ 48.43 e^{-0.046 x} & 13.4 \leq x < 20.7 \\ 97.43 e^{-0.081 x} & 20.7 \leq x < 25.8 \\ 32.28 e^{-0.043 x} & 25.8 \leq x < 39.4 \\ 193.99 e^{-0.056 x} & 39.4 \leq x < 45 \\ 245.52 e^{-0.091 x} & 45 \leq x < 49.35 \\ 81.05 e^{-0.069 x} & 49.35 \leq x < 55 \\ 20.77 e^{-0.042 x} & x \geq 55 \end{cases} \quad \text{para} \quad (4.5)$$

En el apéndice E se describe el procedimiento para obtener estas aproximaciones.

La tabla 4.5 resume las características más importantes del enlace inalámbrico óptico punto a punto.

ENLACE ÓPTICO INALÁMBRICO PUNTO A PUNTO	
Longitud de onda (λ)	658 nm
Tasa de transferencia de bits	400 000 bps
Información transmitida	Audio digitalizado
Frecuencia de muestreo	40 000 muestras/segundo
Distancia del enlace con reflexiones (práctico)	28 m
Distancia del enlace sin reflexiones (teórico)	59 m
Z_{in} (transmisor)	$10^{12} \Omega$
V_{in} max. (transmisor)	5 V
V_{in} min. (transmisor)	1 V
Potencia de salida (transmisor)	64.3 mW
Responsividad max. a 658 nm (receptor)	0.42 A / W
Potencia mínima detectable (receptor)	1.6 mW
V_{out} max. (receptor)	12 V

Tabla 4.5 Características del enlace inalámbrico óptico punto a punto

4.3 Comprobación experimental de un enlace inalámbrico óptico punto a multipunto

En esta sección se explica el desarrollo experimental de un enlace de telecomunicación inalámbrico óptico punto a multipunto.

En la figura 4.19 se muestra el diagrama general a bloques de este enlace.

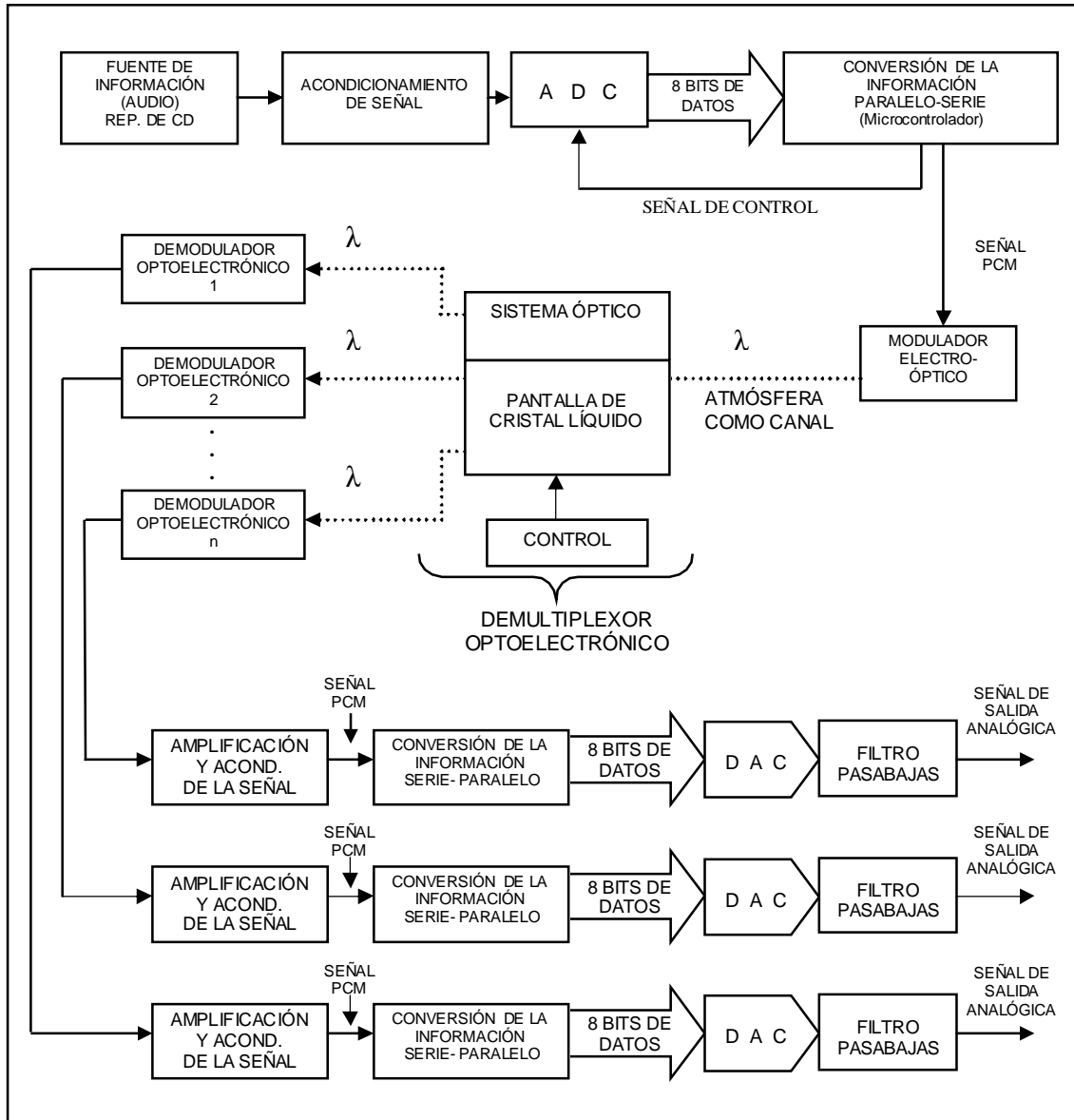


Figura 4.19 Diagrama a bloques del enlace punto a multipunto

4.3.1 Transmisor

El transmisor usado para el enlace inalámbrico óptico punto a multipunto es el mismo utilizado en el enlace punto a punto. En la figura 4.19 se observa esta característica.

Lo que hace posible la distribución de la señal óptica es el dispositivo llamado demultiplexor optoelectrónico que se agrega en el receptor.

4.3.2 Receptor

En el receptor la señal óptica de información es distribuida hacia múltiples puntos de recepción usando el demultiplexor optoelectrónico. Posteriormente en cada punto de recepción es posible usar un sistema de detección de señal óptica como el usado en el enlace punto a punto.

Debido a que el procesamiento electrónico en el enlace punto a punto es idéntico al usado en el enlace punto a multipunto, las características electrónicas así como las señales enviadas y recuperadas son las mismas para los dos enlaces.

A continuación se explica el demultiplexor optoelectrónico implementado.

4.3.2.1 Demultiplexor optoelectrónico

El demultiplexor optoelectrónico implementado se basa en la propuesta presentada en el capítulo 3. En la figura 4.20 se muestra el diagrama del demultiplexor optoelectrónico.

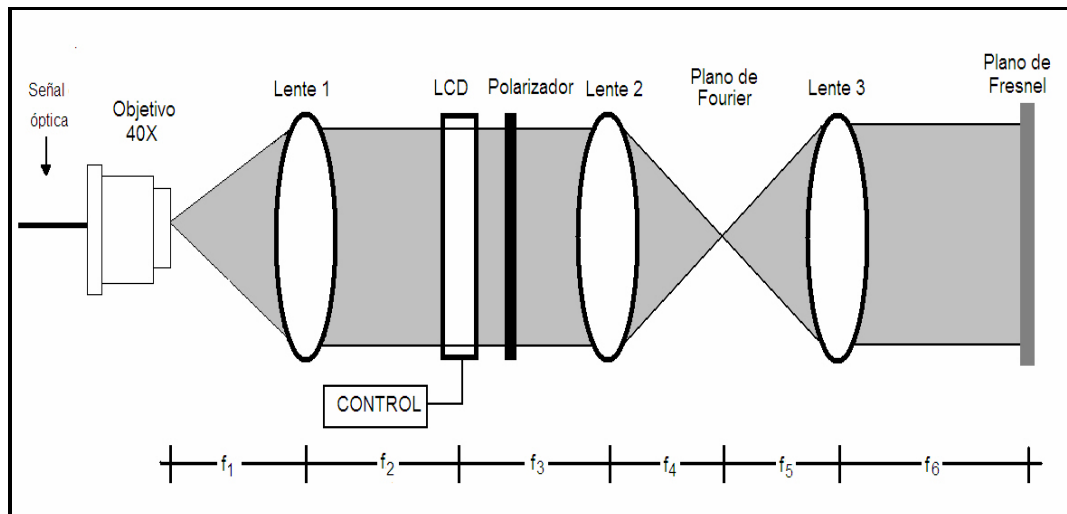
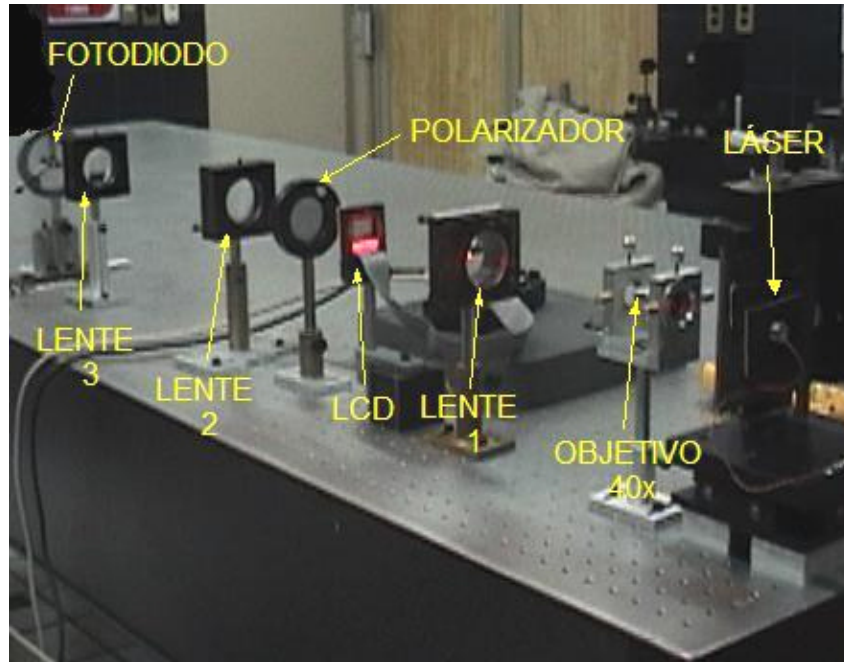


Figura 4.20 Diagrama del demultiplexor optoelectrónico

En la fotografía 4.8 se muestra el demultiplexor optoelectrónico implementado.



Fotografía 4.8 Demultiplexor optoelectrónico

Los valores de las distancias focales usadas para la implementación del demultiplexor optoelectrónico se muestran en la tabla 4.6.

Distancia focal	Medida
f_1	20 cm
f_2	20 cm
f_3	20 cm
f_4	20 cm
f_5	15 cm
f_6	15 cm

Tabla 4.6 Tabla de las distancias focales usadas

Como se explicó en la sección 3.3 la pantalla de cristal líquido y el sistema óptico generan la imagen de la rejilla bidimensional de amplitud desplegada en la pantalla de cristal líquido en el plano de Fresnel en donde la señal es recuperada. Las dimensiones de la rejilla y el flujo de la señal óptica de información, hacia cada punto de detección, son manejados por el sistema de control el cual se explica en la siguiente sección.

4.3.2.2 Sistema de control

El sistema de control tiene como objetivos generar la rejilla bidimensional desplegada por la pantalla de cristal líquido y controlar el flujo de información hacia cada punto de recepción.

El sistema de control está formado por una computadora personal (PC) y un software desarrollado en Visual Basic. La resolución que maneja el software para el monitor es de 800X600 píxeles ya que ésta es la resolución máxima que soporta la pantalla de cristal líquido. En la figura 4.21 se muestra la ventana inicial del programa.

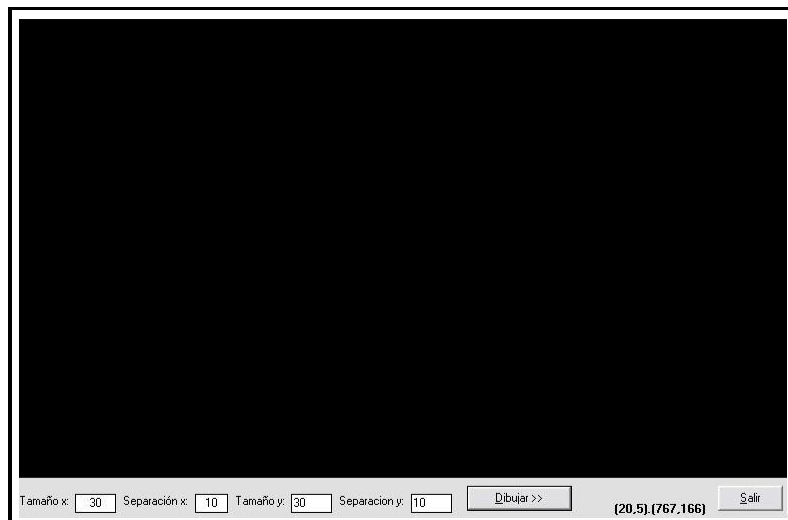


Figura 4.21 Pantalla inicial del programa de control

En la parte inferior de la ventana se observan los campos de las medidas de la rejilla. Estos campos son:

Tamaño x: Tamaño horizontal en píxeles de los elementos de la rejilla.

Separación x: Separación horizontal en píxeles que tendrán los elementos de la rejilla.

Tamaño y: Tamaño vertical en píxeles de los elementos de la rejilla.

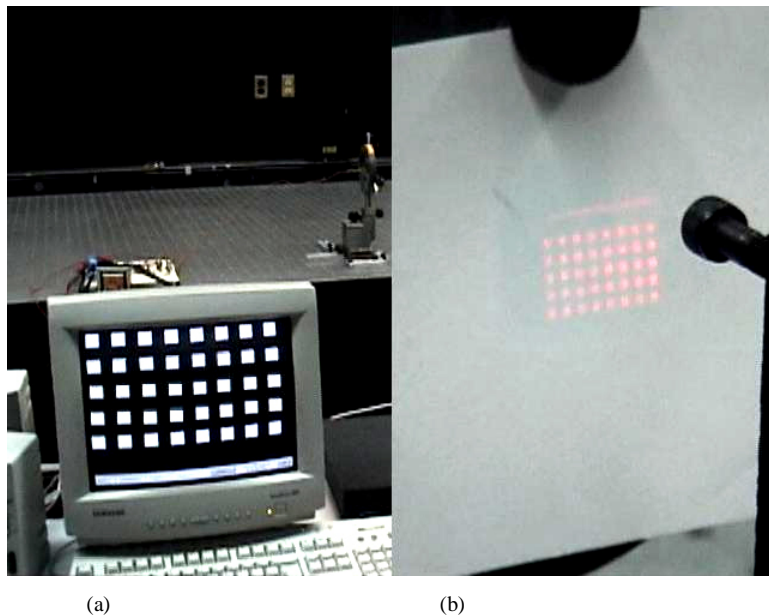
Separación y: Separación vertical en píxeles que tendrán los elementos de la rejilla.

De acuerdo al valor que tengan estos campos se desplegará la rejilla.

En el apéndice B se encuentra el código fuente del programa de control para el demultiplexor optoelectrónico.

El monitor de la PC es conectada en paralelo con la pantalla de cristal líquido. Con esto se consigue que la imagen que se despliega en el monitor sea la desplegada en la pantalla de cristal líquido.

En la fotografía 4.9 a) se muestra la rejilla bidimensional de amplitud desplegada en el monitor, esta rejilla es la que se despliega en la pantalla de cristal líquido. En la fotografía 4.9 b) se muestra la imagen en el plano de Fresnel de la rejilla desplegada en la pantalla de cristal líquido. La imagen está invertida debido a la configuración del sistema óptico.

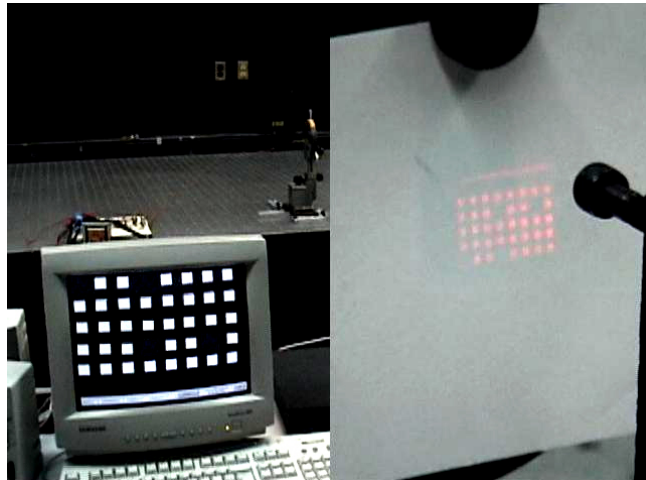


Fotografía 4.9 a) Rejilla desplegada en el monitor, b) Imagen de la rejilla en el plano de Fresnel

En cada elemento de la rejilla bidimensional en el plano de Fresnel es posible detectar la señal óptica por medio de un sistema receptor como el usado en el enlace punto a punto.

El sistema de control también es capaz de conectar y desconectar elementos de la rejilla de manera individual, entonces cada elemento de la rejilla es un interconector optoelectrónico.

En la fotografía 4.10 se observa como el sistema de control desconecta distintos interconectores optoelectrónicos.



Fotografía 4.10 Sistema de control desconectando interconectores optoelectrónicos

En la figura 4.22 se muestra la rejilla usada con la que se obtuvieron el mayor número de puntos donde se puede recuperar la señal de información.

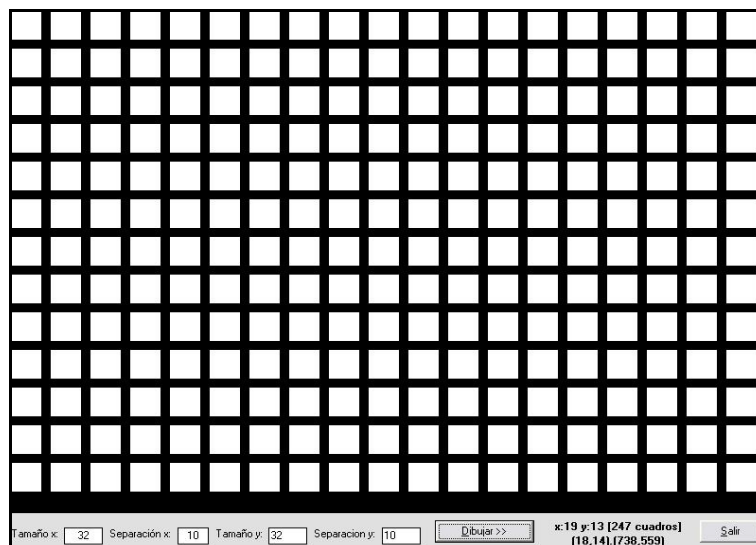


Figura 4.22 Rejilla con la que se obtuvieron el mayor número de puntos donde se puede recuperar la señal

Esta rejilla tiene los siguientes valores:

Tamaño $x= 32$ píxeles.

Separación $x= 10$ píxeles.

Tamaño $y= 32$ píxeles.

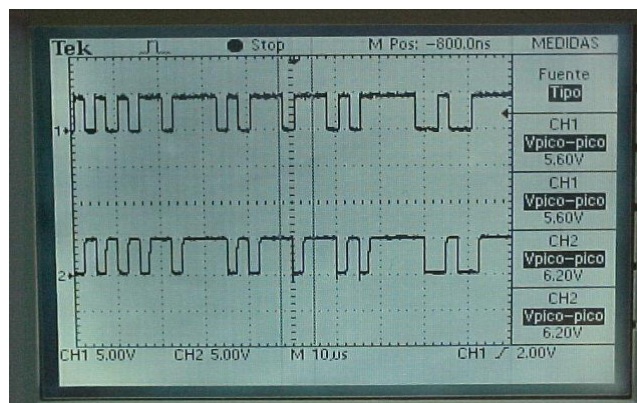
Separación $y= 10$ píxeles.

Con estos valores la rejilla desplegada tiene un total de 247 elementos. De esta forma la pantalla de cristal líquido podrá distribuir la información hacia 247 puntos de detección independientes. Para controlar el flujo de información hacia un punto en particular basta con posicionar el puntero sobre un elemento de la rejilla y presionar el botón izquierdo del ratón, esto ocasionará que el elemento de la rejilla se apague o se prenda en el monitor, y que la pantalla de cristal líquido bloquee o deje pasar la señal óptica de información para el interconector optoelectrónico asociado.

4.3.2.3 Receptor individual de señal óptica

El receptor de señal óptica es el mismo utilizado en el enlace punto a punto. La señal óptica es recuperada con un fotodiodo PIN el cual entrega una señal electrónica de información. Esta señal electrónica es la señal PCM, la cual por medio de un microcontrolador es convertida a una señal digital paralela. Esta señal es procesada por un DAC y un filtro activo pasabajos que recuperan la señal de audio analógica.

En la fotografía 4.11 se muestra una cadena de bits tomada a la salida del microcontrolador del transmisor (canal 1) y la señal a la entrada del microcontrolador del receptor (canal 2).

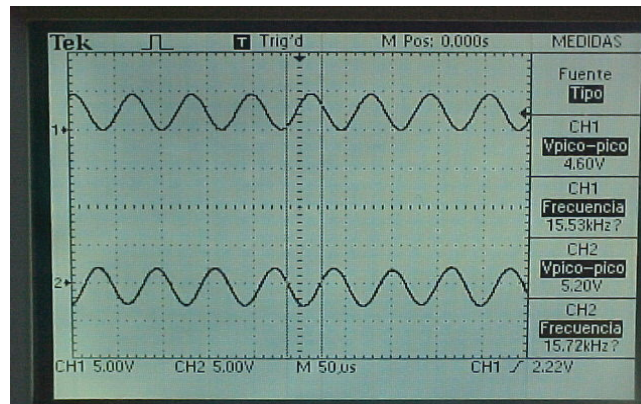


Fotografía 4.11 Señal digital enviada (canal 1) y señal digital recuperada (canal 2).

Se observa que los pulsos de la señal de audio digital enviada corresponden a los pulsos de la señal digital recibida. Se aprecia un retardo de aproximadamente 2.5 μs debido al

procesamiento electrónico de la señal en las etapas del modulador electro-óptico, demodulador optoelectrónico y acondicionamiento de señal a niveles TTL.

En la fotografía 4.12 se muestra la señal analógica de entrada del transmisor y la señal analógica a la salida del receptor. Esta señal es una señal sinusoidal de 15 KHz.



Fotografía 4.12 Señal analógica de entrada al ADC en el transmisor (canal 1) y señal analógica a la salida del receptor (canal 2)

La señal analógica de salida tiene un retardo de aproximadamente 27,5 μ s respecto a la señal analógica de entrada debido al procesamiento electrónico de la señal a través de todo el sistema transmisor y receptor. Los retardos de las señales son iguales tanto en el enlace punto a punto como en el punto a multipunto debido a que el procesamiento electrónico es idéntico.

El apéndice F contiene un DVD con la demostración visual de los dos enlaces implementados en esta tesis.

Capítulo 5

Conclusiones

Se ha diseñado y construido un enlace de telecomunicaciones inalámbrico óptico punto a punto para la transmisión de audio digitalizado y se ha comprobado la viabilidad de la propuesta llamada “Demultiplexor optoelectrónico” mediante la implementación de un enlace de telecomunicaciones inalámbrico óptico punto a multipunto.

Digitalizar la señal es muy importante en la recepción, ya que los pulsos digitales pueden ser reconstruidos y la señal analógica es recuperada de manera exacta en el receptor. Además el tener un sistema digital hace posible la adaptación hacia otro tipo de enlaces, como por ejemplo, un enlace entre computadoras.

La distancia alcanzada por el enlace punto a punto es de 26 m. Tomando en cuenta que la distancia fue obtenida por medio de reflexiones mediante el uso de espejos, los cuales atenúan la señal, la distancia real es mayor, aproximadamente de 60 m. Esto da la posibilidad de establecer un enlace entre dos edificios sin necesidad de cableado entre ellos y sin necesidad del pago de licencias por uso de espectro electromagnético. La distancia del enlace puede ser mejorada con la utilización de componentes de mayor calidad, por ejemplo, un láser que sea capaz de emitir mayor potencia óptica y un fotodiodo con una mayor responsividad. Esto aumentaría considerablemente la distancia del enlace.

Se implementó un enlace de telecomunicaciones inalámbrico óptico punto a multipunto en el cual se logró detectar la señal óptica en 247 puntos. Cada punto es controlado de manera independiente, pudiendo conectar y desconectar cualquier punto en particular de manera sencilla, mediante un sistema de control electrónico compuesto de un software y una computadora personal.

La cantidad de puntos en los que se puede detectar la señal óptica depende directamente del fotodetector. Usando detectores más pequeños y más sensibles se puede incrementar el número de receptores posibles. Si cada píxel de la pantalla de cristal líquido representara un interconector el límite sería de 480 000 interconectores.

Con los resultados obtenidos se demuestra la factibilidad del sistema “Demultiplexor Optoelectrónico” para la distribución de señales ópticas controlando el flujo de información de manera electrónica. Con esto se genera una alternativa para la distribución de señales en forma masiva y controlada.

Parte de resultados obtenidos han sido expuestos y publicados en dos congresos nacionales [25] [26] y en uno internacional [27].

Bibliografía

Libros

- [1] Chapra, S. C., Canale, R. P., Métodos numéricos para ingenieros, McGraw Hill, cuarta edición, 2003.
- [2] Coughlin R. F., Driscoll F. F., Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales, Prentice Hall, Cuarta edición, 1993.
- [3] Dennis P. N. J., Photodetectors: An introduction to current technology, Plenum press, 1987.
- [4] Donati S., Photodetectors: Devices, Circuits and Applications, Prentice Hall, 2000.
- [5] Gowar, J., Optical Communication Systems, Prentice Hall, 1984.
- [6] Haykin S., Digital communication, John Wisley & Sons, 1988.
- [7] Hecht, J., Laser Pioneers, Academic Press Inc, 1991.
- [8] Johnson D. E., Johnson J. R., Moore H. P., A handbook of active filters, Prentice Hall, 1980.
- [9] Keiser, G., Optical fiber communication, McGraw Hill, segunda edición, 1991.
- [10] Luther A. C., Principles of digital audio and video, Artech House, 1997.
- [11] Midwinter, J. E., Optical fiber for transmission, John Wiley & sons, 1979.
- [12] Nieves, A., Domínguez, F. C., Métodos numéricos aplicados a la ingeniería, CECSA, Tercera reimpresión, 1998.
- [13] Roden M. S., Analog and digital communication systems, Prentice Hall, 1996.
- [14] Siegman, A. E., An introduction to lasers and masers, McGraw Hill, 1971.
- [15] Sivalingam, K. M., Subramaniam, S., Optical WDM networks principles and practice, Kluwer Academic Publishers, Third printing 2001.
- [16] Sutherland R. L., Spatial Light modulators, 1998, SPIE.
- [17] Tomasi W., Sistemas de comunicaciones electrónicas, Prentice Hall, Segunda edición, 1996,
- [18] User Guide (Preliminary version), “SVGA2VX Spatial Light Modulator”.
- [19] Yariv A., Optical electronics, Cuarta edición, Saunders Colleges Publishing, Cuarta edición, 1991.

Artículos

- [20] Doerr, C. R., Glance, B., Liou, K. Y., “Full-duplex wavelength division multiplexing system using single-device transceivers”, United States Patent 5 909 294, June 1, 1999.
- [21] Friesem, A. A., Amitai Y., “Holographic optical devices for the transmission of optical signals of a plurality of channels”, United States Patent 5 682 255, October 28, 1997.
- [22] Hara, Y., “Optical communication network system with wavelength-based signal distribution”, United States Patent 6 081 357, June 27, 2000.
- [23] Lightpointe White Paper, “Free Space Optics: A Viable Last Mile Alternative”, pp. 4.

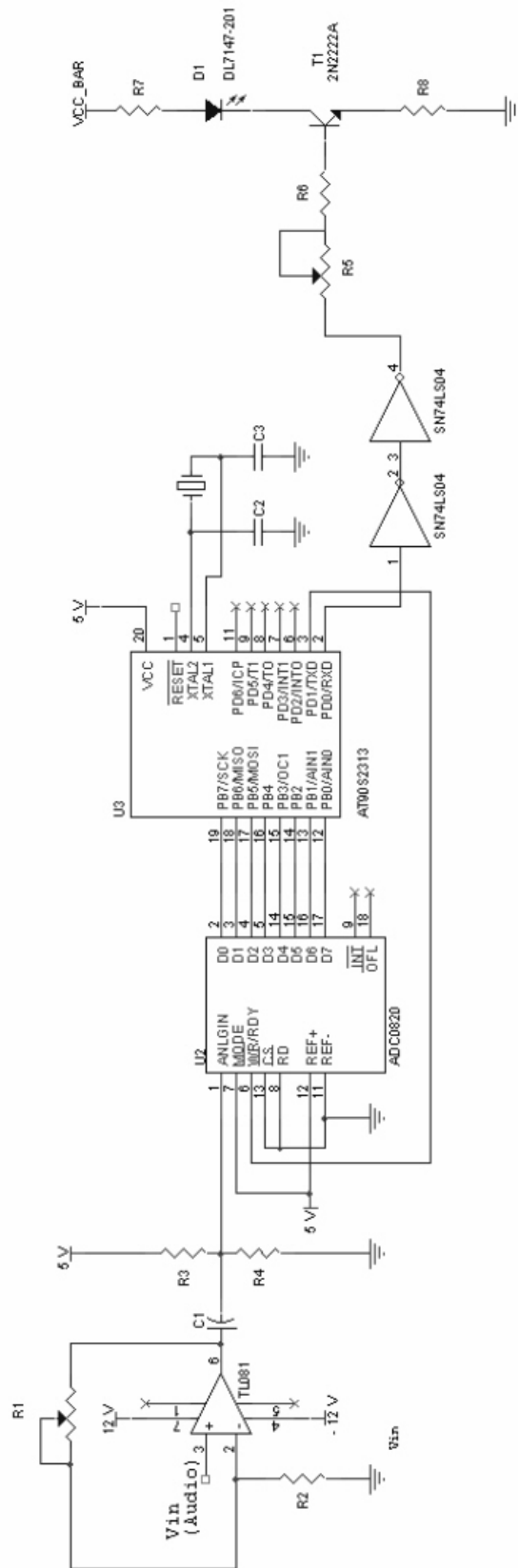
- [24] Majima, M., “Communication system for performing wavelength division multiplexing communications, and wavelength control method use in the system ”, United States Patent 5 801 861, September 1, 1998.
- [25] Olivera-Ramírez A. A., Rivera-López F. J., Tepichín-Rodríguez E., Ramírez-Zavaleta G., “Distribuidor optoelectrónico de una señal luminosa para un receptor inalámbrico óptico”, Memorias en Extenso del XLVII Congreso de la SMF. Referencia 2MD13.
- [26] Olivera-Ramírez A. A., Rivera-López F. J., Tepichín-Rodríguez E., Ramírez-Zavaleta G., “Demultiplexor optoelectrónico para distribuir una señal luminosa en un receptor inalámbrico óptico”, Memorias en Extenso en CD del XIX Congreso de la SOMI.
- [27] Rivera-López F. J., Tepichin-Rodríguez E., Ramírez-Zavaleta G., Olivera-Ramírez A. A., Suárez Romero J. G., “Liquid crystal display as an optoelectronic demultiplexer”, Optics and Optoelectronics 2005, 28 August – 2 September 2005, Warsaw, Poland, Sponsored by SPIE Europe and SPIE Polish Chapter.
- [28] Rivera-López F. J., Tepichin-Rodríguez E., Treviño-Palacios C., “High-speed optical interconnect demultiplexing at the Fresnel Plane”, XVII Proceedings of SPIE, Photonics East 2003, 29 de octubre de 2003, Providence, Rhode Island, USA. , pp 226-236.
- [29] Yu F. T. S., “Optical Signal Processing, Computing, and Neural Networks”, Krieger Publishing Company, Reprint Edition 2000 w/corrections, Malabar Florida USA, pp 287-288.

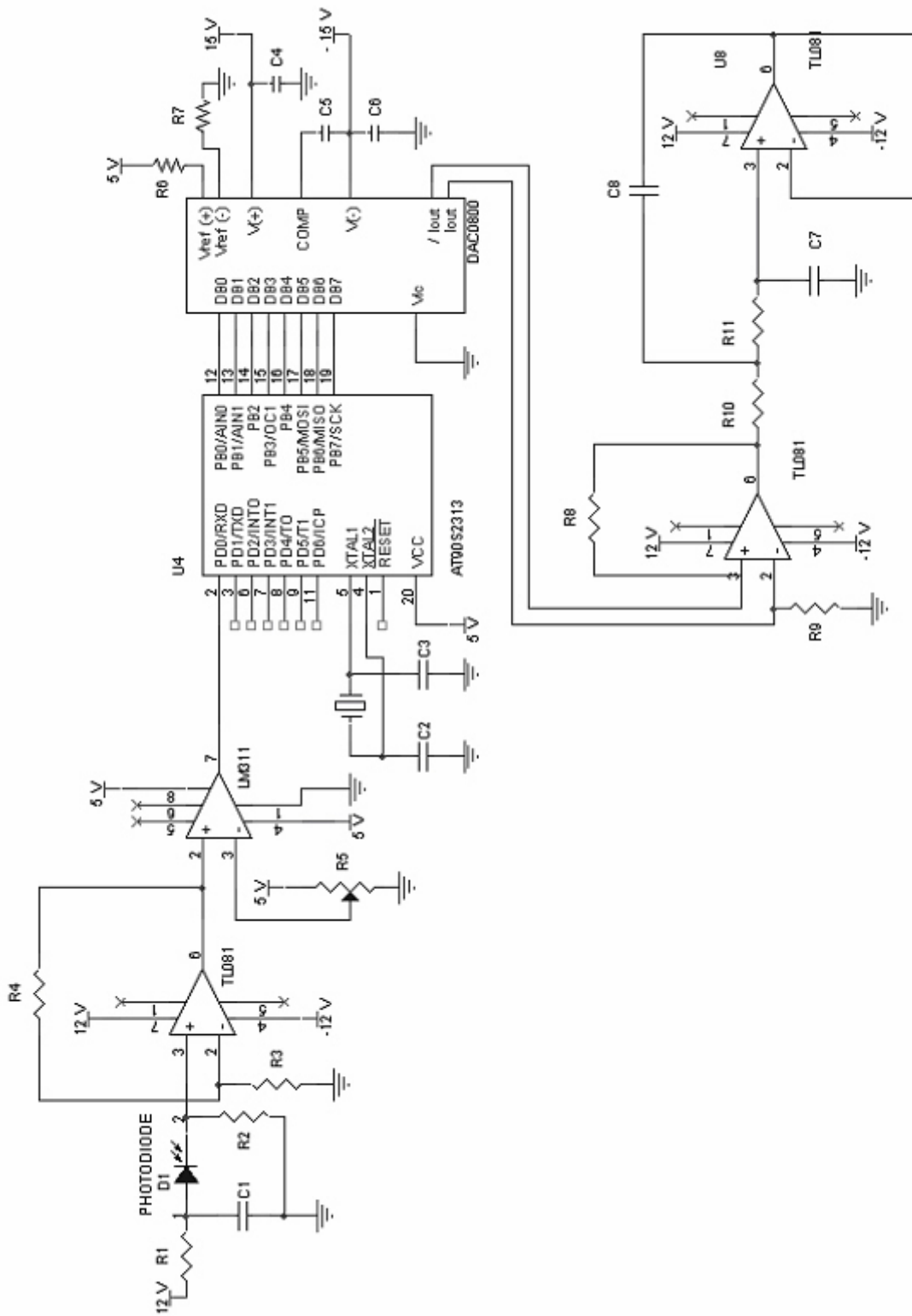
Sitios de internet

- [URL1] http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/DOC0839.PDF AT90S2313 Atmel, “8 Bit AVR Microcontroller with 2K Bytes of In-System Programmable Flash”.
- [URL2] <http://www.lightpointe.com>. “FlightSpectrum™” and “FlightStrata™” series.
- [URL3] <http://www.mellesgriot.com/pdf/001.3-1.5.pdf> Melles Griot, “Paraxial Formulas”, , pag. A1.4.
- [URL4] <http://www.national.com/pf/AD/ADC0820.html> ADC0820 National Semiconductor, “8-bit High Speed μ P Compatible A/D Converter with Track/Hold Function”,
- [URL5] <http://www.national.com/pf/DA/DAC0800.html> DAC0800 National Semiconductor, “DAC0800/DAC0802 8 Bit Digital-to-Analog Converters”.
- [URL6] <http://www.onsemi.com/pub/Collateral/LM211-D.PDF> LM311N On Semiconductors, “LM211, LM311 Single Comparators”,.
- [URL7] <http://www.onsemi.com/pub/Collateral/SN74LS04-D.PDF> SN74LS04 On Semiconductor, “SN74LS04 Hex Inverter”.
- [URL8] <http://www.semicoa.com/pdf/transistor/2n2222a.pdf> 2N2222A Semicoa Semiconductors, “2N2222A Silicon npn transistor”,
- [URL9] <http://www.thorlabs.com/thorcat/0600/0636-S01.pdf> FDS010 Thorlabs inc., “FDS010 Si Photodiode”, , pp. 2.
- [URL10] <http://www.thorlabs.com/thorcat/8700/8739-S01.pdf> DL7147-201 Thorlabs inc., “DL7147-201 Red Laser Diode”,.
- [URL11] <http://www.triohmtec.com/fsotecnologia.shtml> Triohmtec, “Tecnología FSO”,
- [URL12] <http://www.zone.ni.com/devzone/nidzgloss.nsf/webmain/5D9CCE2E632C54848625686A0079402C>., “Página de la compañía Nacional Instruments”

APÉNDICE A

DIAGRAMA DEL TRANSMISOR Y DEL RECEPTOR





APÉNDICE B

CÓDIGO FUENTE DEL PROGRAMA DE CONTROL PARA EL DEMULTIPLEXOR OPTOELECTRÓNICO

Mainfrm (código)

Option Explicit

```
Dim relx As Single
Dim rely As Single
Dim resorX As Single
Dim resorY As Single
```

```
Private Sub btnOffice1_Click()
    Call ChangeRes(resorY, resorX)
End
End Sub
```

```
Private Sub btnOffice2_Click()
    Dim x As Single
    Dim y As Single
    Dim i As Single
    Dim j As Single
    Dim limx As Single
    Dim limy As Single
```

```
mainfrm.Cls
size.Refresh
size2.Refresh
separate2.Refresh
separate.Refresh
btnoffice1.Refresh
btnoffice2.Refresh
' 800x560 area de trabajo
' se calcula el numero de cuadros horizontales
Do
    i = i + CInt(size) + CInt(separate)
    If i <= 800 Then limx = limx + 1
Loop While i <= 800

' se calcula el numero de cuadros verticales
Do
    j = j + CInt(size2) + CInt(separate2)
    If j <= 560 Then limy = limy + 1
Loop While j <= 560

y = 0
```

```
For j = 1 To limy
    For i = 1 To limx
        If i = 1 Then
            x = 0
            mainfrm.Line (x, y)-(x + CInt(size) - 1, y + CInt(size2) - 1), vbWhite, BF
            x = x + CInt(size)
        Else
            x = x + CInt(separate)
            mainfrm.Line (x, y)-(x + CInt(size) - 1, y + CInt(size2) - 1), vbWhite, BF
            x = x + CInt(size)
        End If
    Next i
Next j
```

```
        End If
    Next
    y = y + CInt(size2) + CInt(separate2)
    x = 0
    DoEvents
Next
number.Caption = "x:" + CStr(limx) + " y:" + CStr(limy) + " [" + CStr(limy * limx) + " cuadros]"

End Sub

Private Sub Form_Load()

    Dim Msg As String
    resorY = GetSystemMetrics(0)
    resorX = GetSystemMetrics(1)

    If resorX <> 600 And resorY <> 800 Then

        Call ChangeRes(800, 600)
    End If

End Sub

Private Sub Form_MouseMove(Button As Integer, Shift As Integer, x As Single, y As Single)

    Dim i As Single

    relx = x
    While relx > 0
        relx = relx - CInt(size) - CInt(separate)
        i = i + 1
    Wend
    relx = i

    i = 0
    rely = y
    While rely > 0
        rely = rely - CInt(size2) - CInt(separate2)
        i = i + 1
    Wend
    rely = i

    otro.Caption = "(" + CStr(relx) + "," + CStr(rely) + ").(" + CStr(x) + "," + CStr(y) + ")"
End Sub

Private Sub Form_MouseUp(Button As Integer, Shift As Integer, x As Single, y As Single)

    Dim i As Single
    Dim absx As Single
    Dim absy As Single
    Dim aux1 As Single
    Dim aux2 As Single

    absx = (relx - 1) * (CInt(size) + CInt(separate))
```

```

absy = (rely - 1) * (CInt(size2) + CInt(separate2))

aux1 = absy + CInt(size2)
aux2 = absx + CInt(size)
If aux2 < 800 Then
If aux1 < 560 Then
    If mainfrm.Point(x, y) = vbWhite Then
        mainfrm.Line (absx, absy)-(absx + CInt(size) - 1, absy + CInt(size2) - 1), vbBlack, BF
    ElseIf mainfrm.Point(x, y) = vbBlack Then
        mainfrm.Line (absx, absy)-(absx + CInt(size) - 1, absy + CInt(size2) - 1), vbWhite, BF
    End If
End If
End If

End Sub

```

Module.bas

```

Public Declare Function GetSystemMetrics Lib "user32.dll" (ByVal nIndex As Long) As Long
Private Declare Function EnumDisplaySettings Lib "user32.dll" Alias "EnumDisplaySettingsA" (ByVal
lpDeviceName As Long, ByVal iModeNum As Long, lpDevMode As Any) As Boolean
Public Declare Function ChangeDisplaySettings Lib "user32.dll" Alias "ChangeDisplaySettingsA" (lpDevMode
As Any, ByVal dwFlags As Long) As Long

```

```

Const CCDEVICENAME = 32
Const CCFORMNAME = 32
Const DM_PELSWIDTH = &H80000
Const DM_PELSHEIGHT = &H100000

```

```

Public Type DEVMODE
    dmDeviceName As String * CCDEVICENAME
    dmSpecVersion As Integer
    dmDriverVersion As Integer
    dmSize As Integer
    dmDriverExtra As Integer
    dmFields As Long
    dmOrientation As Integer
    dmPaperSize As Integer
    dmPaperLength As Integer
    dmPaperWidth As Integer
    dmScale As Integer
    dmCopies As Integer
    dmDefaultSource As Integer
    dmPrintQuality As Integer
    dmColor As Integer
    dmDuplex As Integer
    dmYResolution As Integer
    dmTTOption As Integer
    dmCollate As Integer
    dmFormName As String * CCFORMNAME
    dmUnusedPadding As Integer
    dmBitsPerPel As Integer
    dmPelsWidth As Long
    dmPelsHeight As Long
    dmDisplayFlags As Long

```

```
    dmDisplayFrequency As Long
End Type

Public DevChg As DEVMODE

Public Sub ChangeRes(iWidth As Single, iHeight As Single)
    Dim a As Boolean
    Dim i&
    i = 0

    Do
        a = EnumDisplaySettings(0&, i&, DevChg)
        i = i + 1
    Loop Until (a = False)

    Dim b&
    DevChg.dmFields = DM_PELSWIDTH Or DM_PELSHEIGHT
    DevChg.dmPelsWidth = iWidth
    DevChg.dmPelsHeight = iHeight
    b = ChangeDisplaySettings(DevChg, 0)

End Sub
```

APÉNDICE C

PROGRAMAS DE LOS MICROCONTROLADORES

APÉNDICE D

PROCESO DE DISEÑO DEL MODULADOR ELECTRO-ÓPTICO

En la figura E.1 se muestra el diagrama del demodulador electro-óptico.

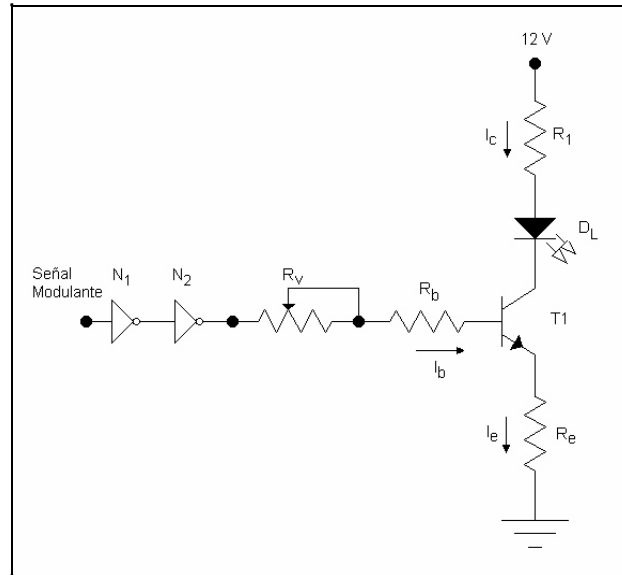


Figura E.1 Diagrama del modulador electro-óptico

El proceso de diseño es el siguiente:

1. Se establece una corriente de colector $I_c=100$ mA que es la corriente a la que se va trabajar el diodo láser.

2. Se calcula la resistencia del diodo láser.

$$R_d = \frac{V_{op}}{I_c} = \frac{2.7V}{100mA} = 27\Omega \quad (D.1)$$

V_{op} es el voltaje de operación real del diodo láser.

3. Se calcula R_e en base a:

$$V_{cc} = R_c I_c + \frac{V_{cc}}{2} + R_e I_e \quad (D.2)$$

R_c es la resistencia de colector formada por R_1 y la resistencia del diodo R_d .

Si $V_{cc} = 12V$, $R_c=10R_e$ e $I_c \approx I_e$ entonces,

$$6V = 10R_e I_c + R_e I_c \quad (D.3)$$

Despejando R_e ,

$$R_e = \frac{6V}{11(100mA)} = 5.45\Omega \quad (D.4)$$

4. Se calcula R_1 .
Se tiene que

$$R_c = 10R_e = 54.5\Omega \quad (D.5)$$

Si

$$R_c = R_1 + R_d \quad (D.6)$$

entonces

$$R_1 = R_c - R_d = 27.5\Omega \quad (D.7)$$

6. Se calcula R_B

La resistencia total de la base R_B , está dada por:

$$R_B = R_v + R_b \quad (D.8)$$

R_v es una resistencia variable que ajusta corriente que pasa por el diodo láser y R_b es la resistencia que limita la corriente que pasa por el diodo láser.

La resistencia R_B se calcula en base a lo siguiente.

Se establece la siguiente ecuación en base a ley de voltajes para cuando la señal modulante es igual a 5V

$$5V = I_b R_B + 0.7V + I_e R_e \quad (D.9)$$

por otro lado se tiene

$$I_c = (\beta)(I_b) \quad (D.10)$$

β es el coeficiente de ganancia del transistor. Despejando I_b de la ec. D.10 se tiene

$$I_b = \frac{I_c}{\beta} = \frac{100mA}{200} = 0.5mA \quad (D.11)$$

se calcula R_B despejando de la ec. D.9

$$R_B = \frac{5V - 0.7V - I_e R_e}{I_b} \quad (D.12)$$

sustituyendo valores se tiene

$$R_B = \frac{5V - 0.7 - (100mA * 5.45\Omega)}{0.5mA} = 7.5K\Omega$$

Teniendo el valor de R_B se puede decidir que valores debe tener R_v y R_b . Se escoge un valor de R_B poco mayor a al calculado, esto para proteger al diodo láser y R_v se escoge de acuerdo al valor mínimo de corriente que se quiera tener.

APÉNDICE E

APROXIMACIONES PARA OBTENER LA DISTANCIA MÁXIMA SIN REFLEXIONES EN EL ENLACE PUNTO A PUNTO

Las dos aproximaciones de la distancia máxima sin reflexiones para el enlace inalámbrico óptico punto a punto se hacen de acuerdo al método de aproximación polinomial con mínimos cuadrados.

La primera aproximación se hace de la siguiente manera.

1.- Se parte de la gráfica obtenida de las mediciones de potencia óptica a diferentes distancias y de las 11 primeras mediciones. La gráfica se muestra en la figura E.1 y las mediciones en la tabla E.1

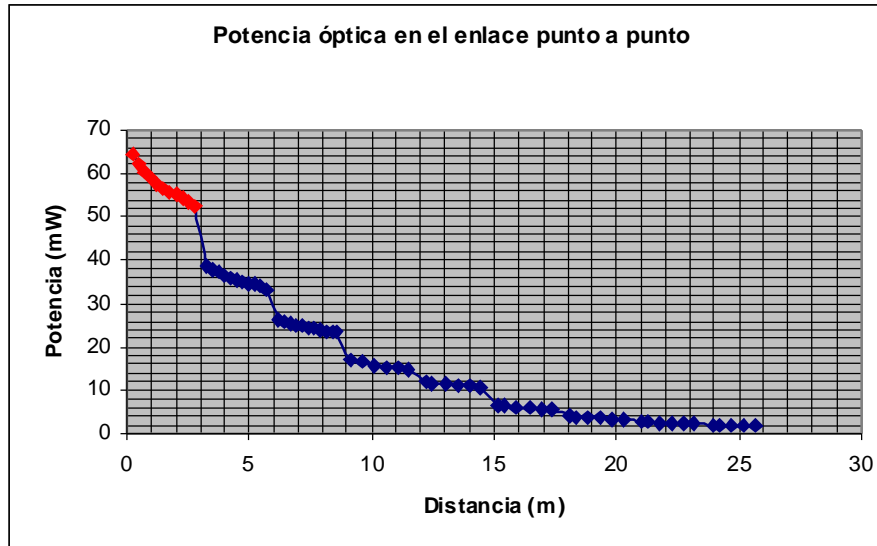


Figura E.1 Potencia óptica en el enlace punto a punto

No.	Distancia (m)	Potencia (mW)
1	0.25	64.7
2	0.5	62.4
3	0.75	60.4
4	1	58.8
5	1.25	57.5
6	1.5	56.7
7	1.75	55.9
8	2	55.1
9	2.25	54.3
10	2.5	53.6
11	2.75	52.7

Tabla E.1 Primeras 11 mediciones de potencia óptica en el enlace punto a punto

2.- Se observan los 11 primeros puntos (puntos en rojo) y se propone una función de la forma [1]:

$$p(x) = Ae^{Bx} \tag{E.1}$$

donde: $p(x)$ = potencia óptica en mW.
 x = distancia en m.

3.- Se linealiza la función [1].

$$\ln(p(x)) = Bx + \ln(A) \tag{E.2}$$

4.- Se hace un cambio de variable:

$$P(X) = \ln(p(x)), x=X \text{ y } C=\ln(A)$$

5.- Se ajusta la nueva variable $P(X)=\ln(p(x))$ como una función lineal.

$$P(X)=BX+C \tag{E.3}$$

6.- Se aplica el método de aproximación polinomial por mínimos cuadrados a la función E.3 de la siguiente manera [12]:

De acuerdo a las primeras 11 mediciones se obtiene la tabla E.2.

i	(X _i)	p(x _i)	P(X _i) ln(p(x _i))	X _i ²	P(X _i) * X _i X _i * ln(p(x _i))
1	0.25	64.7	4.169	0.0625	1.042
2	0.5	62.4	4.133	0.25	2.066
3	0.75	60.4	4.100	0.5625	3.075
4	1	58.8	4.074	1	4.074
5	1.25	57.5	4.051	1.5625	5.064
6	1.5	56.7	4.037	2.25	6.056
7	1.75	55.9	4.023	3.0625	7.041
8	2	55.1	4.009	4	8.018
9	2.25	54.3	3.994	5.0625	8.987
10	2.5	53.6	3.981	6.25	9.953
m=11	2.75	52.7	3.964	7.5625	10.902
Σ	16.5	632.1	44.541	31.625	66.284

Tabla E.2 Tabla usada para calcular la primera aproximación

Se aplica las siguientes fórmulas E.4 y E.5 [12] para encontrar C y B.

$$C = \frac{[\sum_{i=1}^m P(X_i)][\sum_{i=1}^m X_i^2] - [\sum_{i=1}^m X_i][\sum_{i=1}^m P(X_i)X_i]}{m\sum_{i=1}^m X_i^2 - [\sum_{i=1}^m X_i]^2} \tag{E.4}$$

$$B = \frac{m\sum_{i=1}^m P(X_i)X_i - [\sum_{i=1}^m P(X_i)][\sum_{i=1}^m X_i]}{m\sum_{i=1}^m X_i^2 - [\sum_{i=1}^m X_i]^2} \tag{E.5}$$

$$C=4.1643 \text{ y } B=-0.0767$$

Una vez calculados C y B, hallamos el parámetro A de la relación:

$$\begin{aligned}\ln(A) &= C & (E.6) \\ A &= e^C \\ A &= 64.3532\end{aligned}$$

Entonces la función que describe la primera aproximación es:

$$p(x) = 64.3532 e^{-0.0767 x} \quad (E.7)$$

Usando la ecuación E.7 se hace una extrapolación con la finalidad encontrar la distancia x para una potencia $P(x)=1.66\text{mW}$ (mínima potencia detectable por el sistema receptor). La distancia calculada será la distancia máxima alcanzada por el enlace inalámbrico óptico punto a punto.

$$\begin{aligned}1.66 &= 64.3532 e^{-0.076 x} \\ x &= (\ln(1.66 / 64.3532)) / -0.0767 \\ x &= 47.6 \text{ m}\end{aligned}$$

En la figura E.2 podemos ver la gráfica de la primera aproximación.

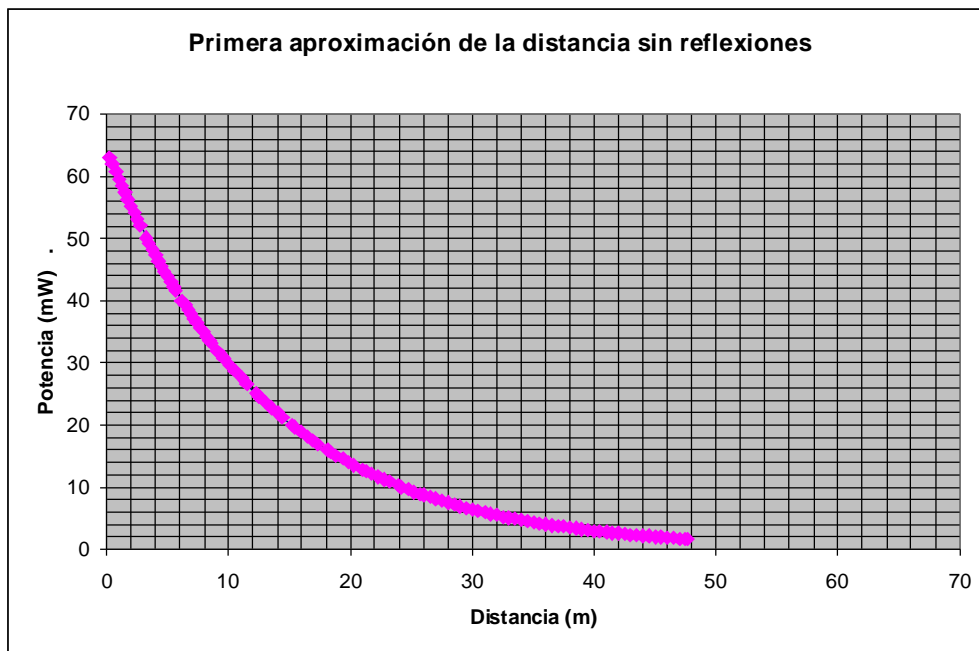


Figura E.2 Primera aproximación de la distancia sin reflexiones

La segunda aproximación se compone de un total de 9 segmentos. Para cada segmento se hace una aproximación similar a la que se hace para calcular la primera aproximación. El procedimiento es el siguiente:

1.- Se parte de la grafica E.1 y de la tabla E.3 que muestran las mediciones de potencia óptica a diferentes distancias.

No.	Distancia (m)	Potencia (mW)	No.	Distancia (m)	Potencia (mW)	No.	Distancia (m)	Potencia (mW)
1	0.25	64.7	24	6.42	25.8	47	15.43	6.3
2	0.5	62.4	25	6.67	25.4	48	15.93	6.1
3	0.75	60.4	26	6.92	25	49	16.43	5.9
4	1	58.8	27	7.17	24.8	50	16.93	5.5
5	1.25	57.5	28	7.42	24.5	51	17.35	5.4
6	1.5	56.7	29	7.67	24.4	52	18.1	4
7	1.75	55.9	30	7.92	24.1	53	18.35	3.9
8	2	55.1	31	8.17	23.7	54	18.85	3.76
9	2.25	54.3	32	8.42	23.4	55	19.35	3.55
10	2.5	53.6	33	8.59	23.3	56	19.85	3.38
11	2.75	52.7	34	9.09	17.1	57	20.27	3.3
12	3.25	38.6	35	9.59	16.4	58	21.02	2.68
13	3.5	37.8	36	10.09	15.8	59	21.27	2.62
14	3.75	37.2	37	10.59	15.4	60	21.77	2.5
15	4	36.6	38	11.09	15	61	22.27	2.44
16	4.25	35.8	39	11.51	14.7	62	22.77	2.36
17	4.5	35.5	40	12.26	11.8	63	23.19	2.3
18	4.75	35	41	12.51	11.6	64	23.94	1.8
19	5	34.7	42	13.01	11.4	65	24.19	1.75
20	5.25	34.4	43	13.51	11.2	66	24.69	1.72
21	5.5	33.9	44	14.01	10.9	67	25.19	1.69
22	5.67	33.3	45	14.43	10.7	68	25.69	1.66
23	6.17	26.1	46	15.18	6.5			

Tabla E.3 Mediciones de potencia óptica en el enlace punto a punto

2.- Se calcula la aproximación del primer segmento usando el mismo procedimiento que se usó para calcular la primera aproximación. Para el primer segmento se usan las 11 primeras mediciones y se hacen los cálculos en base a la tabla E.2 y las formulas E.4 y E.5. Entonces la función es:

$$p(x) = 64.3532 e^{-0.0767 x} \tag{E.8}$$

La función para el primer segmento (E.8) es igual a la función que describe la primera aproximación (E.7) porque para el cálculo de estas aproximaciones se usan las mismas mediciones (medición 1 a medición 11).

3.- Se hace una extrapolación para encontrar la distancia x para una potencia de 38.6 mW usando la ecuación E.8. Esta potencia es la medición que se tiene después de la primera reflexión (medición 12).

$$38.6 = 64.3532 e^{-0.0767 x}$$

$$x = (\ln(38.6 / 64.3532)) / -0.0767$$

$$x = 6.65$$

4.- Se encuentra la diferencia entre la distancia calculada D_{C1} y la distancia medida experimentalmente D_{M1} para una potencia de 38.6 mW.

$$D_1 = D_{C1} - D_{M1}$$

$$D_1 = 6.65 - 3.25$$

$$D_1 = 3.4$$

5.- Se suma D_1 a las distancias de las 11 siguientes mediciones (medición 11 a medición 22). Y se construye la tabla E.4.

i	(X_i)	$p(x_i)$	$P(X_i)$ $\ln(p(x_i))$	$(X_i)^2$	$X_i * P(X_i)$ $X_i * \ln(p(x_i))$
1	6.65	38.6	3.65325228	44.2225	24.2941276
2	6.9	37.8	3.6323091	47.61	25.0629328
3	7.15	37.2	3.61630876	51.1225	25.8566076
4	7.4	36.6	3.60004824	54.76	26.640357
5	7.65	35.8	3.57794789	58.5225	27.3713014
6	7.9	35.5	3.5695327	62.41	28.1993083
7	8.15	35	3.55534806	66.4225	28.9760867
8	8.4	34.7	3.54673969	70.56	29.7926134
9	8.65	34.4	3.53805656	74.8225	30.6041893
10	8.9	33.9	3.52341501	79.21	31.3583936
m=11	9.07	33.3	3.5055574	82.2649	31.7954056
Σ	86.82	392.8	39.3185157	691.9274	309.951323

Tabla E.4 Tabla usada para calcular la aproximación del segundo segmento

6.- Siguiendo el mismo procedimiento se calcula la aproximación para el segundo segmento usando la tabla E.4. Haciendo los cálculos la función es:

$$p(x) = 55.8848 e^{-0.0567 x} \tag{E.9}$$

7.- Se hace una extrapolación para encontrar la distancia x para una potencia de 26.1 mW usando la ecuación E.9. Esta potencia es la medición que se tiene después de la segunda reflexión (medición 23).

$$26.1 = 55.8848 e^{-0.0567 x}$$

$$x = (\ln(26.1 / 55.8848)) / -0.0567$$

$$x = 13.4$$

8.- Se encuentra la diferencia entre la distancia calculada D_{C2} y la distancia medida D_{M2} a 26.1 mW.

$$D_2 = D_{C2} - D_{M2}$$

$$D_2 = 13.4 - 6.17$$

$$D_2 = 7.23$$

9.- Se suma D_2 a las distancias de las 11 siguientes mediciones (medición 23 a medición 33). Y se construye la tabla E.5.

i	(X_i)	$p(x_i)$	$P(X_i)$ $\ln(p(x_i))$	$(X_i)^2$	$X_i * P(X_i)$ $X_i * \ln(p(x_i))$
1	13.4	26.1	3.26193531	179.56	43.7099332
2	13.65	25.8	3.25037449	186.3225	44.3676118
3	13.9	25.4	3.23474917	193.21	44.9630135
4	14.15	25	3.21887582	200.2225	45.5470929
5	14.4	24.8	3.21084365	207.36	46.2361486
6	14.65	24.5	3.19867312	214.6225	46.8605612
7	14.9	24.4	3.19458313	222.01	47.5992887
8	15.15	24.1	3.18221184	229.5225	48.2105094
9	15.4	23.7	3.16547505	237.16	48.7483157
10	15.65	23.4	3.15273602	244.9225	49.3403187
m=11	15.82	23.3	3.14845336	250.2724	49.8085322
Σ	161.07	270.5	35.218911	2365.1849	515.391326

Tabla E.5 Tabla usada para calcular la aproximación del tercer segmento

10.- Siguiendo el mismo procedimiento se calcula la aproximación para el tercer segmento usando la tabla E.5. Haciendo los cálculos la función es:

$$p(x) = 48.4362 e^{-0.0463 x} \tag{E.10}$$

11.- Se hace una extrapolación para encontrar la distancia x para una potencia de 17.1 mW usando la ecuación E.10. Esta potencia es la medición que se tiene después de la tercera reflexión (medición 34).

$$17.1 = 48.4362 e^{-0.0463 x}$$

$$x = (\ln(17.1/48.4362)) / -0.0463$$

$$x = 22.4$$

12.- Se encuentra la diferencia entre la distancia calculada D_{C3} y la distancia medida D_{M3} a 17.1 mW.

$$D_3 = D_{C3} - D_{M3}$$

$$D_3 = 22.4 - 9.09$$

$$D_3 = 13.31$$

13.- Se suma D_3 a las distancias de las 6 siguientes mediciones (medición 34 a medición 39). Y se construye la tabla E.6.

i	(X _i)	p(x _i)	P(X _i) ln (p(x _i))	(X _i) ²	X _(i) * P(X _i) X _(i) * ln (p(x _i))
1	22.4	17.1	2.83907846	501.76	63.5953576
2	22.9	16.4	2.79728133	524.41	64.0577426
3	23.4	15.8	2.76000994	547.56	64.5842326
4	23.9	15.4	2.73436751	571.21	65.3513835
5	24.4	15	2.7080502	595.36	66.0764249
M=6	24.82	14.7	2.68784749	616.0324	66.7123748
Σ	141.82	94.4	16.5266349	3356.3324	390.377516

Tabla E.6 Tabla usada para calcular la aproximación del cuarto segmento

14.- Siguiendo el mismo procedimiento se calcula la aproximación para el cuarto segmento usando la tabla E.6. Haciendo los cálculos la función es:

$$p(x) = 67.2111 e^{-0.0614 x} \tag{E.11}$$

15.- Se hace una extrapolación para encontrar la distancia x para una potencia de 11.8 mW usando la ecuación E.11. Esta potencia es la medición que se tiene después de la cuarta reflexión (medición 40).

$$11.8 = 67.2111 e^{-0.0614 x}$$

$$x = (\ln (11.8 / 67.2111)) / -0.0614$$

$$x = 28.25$$

16.- Se encuentra la diferencia entre la distancia calculada D_{C4} y la distancia medida D_{M4} a 11.8 mW.

$$D_4 = D_{C4} - D_{M4}$$

$$D_4 = 28.25 - 12.26$$

$$D_4 = 15.99$$

17.- Se suma D₄ a las distancias de las 6 siguientes mediciones (medición 40 a medición 45). Y se construye la tabla E.7.

i	(X _i)	p(x _i)	P(X _i) ln (p(x _i))	(X _i) ²	X _(i) * P(X _i) X _(i) * ln (p(x _i))
1	28.25	11.8	2.46809953	798.0625	69.7238118
2	28.49	11.6	2.4510051	811.6801	69.8291352
3	29	11.4	2.43361336	841	70.5747873
4	29.5	11.2	2.41591378	870.25	71.2694565
5	30	10.9	2.38876279	900	71.6628837
M=6	30.42	10.7	2.37024374	925.3764	72.1028146
Σ	175.66	67.6	14.5276383	5146.369	425.162889

Tabla E.7 Tabla usada para calcular la aproximación del quinto segmento

18.- Siguiendo el mismo procedimiento se calcula la aproximación para el quinto segmento usando la tabla E.7. Haciendo los cálculos la función es:

$$p(x) = 40.2512 e^{-0.0435 x} \tag{E.12}$$

19.- Se hace una extrapolación para encontrar la distancia x para una potencia de 6.5 mW usando la ecuación E.12. Esta potencia es la medición que se tiene después de la quinta reflexión (medición 46).

$$6.5 = 40.2512 e^{-0.0435 x}$$

$$x = (\ln (6.5 / 40.2512)) / -0.0435$$

$$x = 41.9$$

20.- Se encuentra la diferencia entre la distancia calculada D_{C5} y la distancia medida D_{M5} a 6.5 mW.

$$D_5 = D_{C5} - D_{M5}$$

$$D_5 = 41.9 - 15.18$$

$$D_5 = 26.72$$

21.- Se suma D_5 a las distancias de las 6 siguientes mediciones (medición 46 a medición 51). Y se construye la tabla E.8.

i	(X_i)	p(x_i)	P(X_i) ln (p(x_i))	(X_i) ²	X_i * P(X_i) X_i * ln (p(x_i))
1	41.9	6.5	1.87180218	1755.61	78.4285112
2	42.15	6.3	1.84054963	1776.6225	77.579167
3	42.65	6.1	1.80828877	1819.0225	77.1235161
4	43.15	5.9	1.77495235	1861.9225	76.5891939
5	43.65	5.5	1.70474809	1905.3225	74.4122542
6	44.07	5.4	1.68639895	1942.1649	74.3196019
m=Σ	257.57	35.7	10.68674	11060.6649	458.452244

Tabla E.8 Tabla usada para calcular la aproximación del sexto segmento

22.- Siguiendo el mismo procedimiento se calcula la aproximación para el sexto segmento usando la tabla E.8. Haciendo los cálculos la función es:

$$p(x) = 240.6679 e^{-0.0862 x} \tag{E.13}$$

23.- Se hace una extrapolación para encontrar la distancia x para una potencia de 4 mW usando la ecuación E.13. Esta potencia es la medición que se tiene después de la sexta reflexión (medición 52).

$$4 = 240.6679 e^{-0.0862 x}$$

$$x = (\ln (4 / 240.6679)) / -0.0862$$

$$x = 47.5$$

24.- Se encuentra la diferencia entre la distancia calculada D_{C6} y la distancia medida D_{M6} a 4 mW.

$$D_6 = D_{C6} - D_{M6}$$

$$D_6 = 47.5 - 18.1$$

$$D_6=29.4$$

25.- Se suma D_6 a las distancias de las 6 siguientes mediciones (medición 52 a medición 57). Y se construye la tabla E.9.

i	(X_i)	$p(x_i)$	$P(X_i)$ $\ln(p(x_i))$	$(X_i)^2$	$X_i * P(X_i)$ $X_i * \ln(p(x_i))$
1	47.5	4	1.38629436	2256.25	65.8489822
2	47.75	3.9	1.36097655	2280.0625	64.9866304
3	48.25	3.76	1.32441896	2328.0625	63.9032147
4	48.75	3.55	1.2669476	2376.5625	61.7636957
5	49.25	3.38	1.21787571	2425.5625	59.9803787
m=6	49.67	3.3	1.19392247	2467.1089	59.302129
Σ	291.17	21.89	7.75043565	14133.6089	375.785031

Tabla E.9 Tabla usada para calcular la aproximación del séptimo segmento

26.- Siguiendo el mismo procedimiento se calcula la aproximación para el séptimo segmento usando la tabla E.9. Haciendo los cálculos la función es:

$$p(x) = 308.6342 e^{-0.0915 x} \tag{E.14}$$

27.- Se hace una extrapolación para encontrar la distancia x para una potencia de 2.68 mW usando la ecuación E.13. Esta potencia es la medición que se tiene después de la séptima reflexión (medición 58).

$$2.68 = 308.6342 e^{-0.0915 x}$$

$$x = (\ln(2.68 / 308.6342)) / -0.0915$$

$$x = 51.85$$

28.- Se encuentra la diferencia entre la distancia calculada D_{C7} y la distancia medida D_{M7} a 2.68 mW.

$$D_7 = D_{C7} - D_{M7}$$

$$D_7 = 51.85 - 21.02$$

$$D_7 = 30.83$$

29.- Se suma D_7 a las distancias de las 6 siguientes mediciones (medición 58 a medición 63). Y se construye la tabla E.10.

i	(X_i)	$p(x_i)$	$P(X_i)$ $\ln(p(x_i))$	$(X_i)^2$	$X_i * P(X_i)$ $X_i * \ln(p(x_i))$
1	51.85	2.68	0.98581679	2688.4225	51.1146008
2	52.1	2.62	0.96317432	2714.41	50.181382
3	52.6	2.5	0.91629073	2766.76	48.1968925
4	53.1	2.44	0.89199804	2819.61	47.3650959
5	53.6	2.36	0.85866162	2872.96	46.0242628
m=6	54.02	2.3	0.83290912	2918.1604	44.9937508
Σ	317.27	14.9	5.44885063	16780.3229	287.875985

Tabla E.10 Tabla usada para calcular la aproximación del octavo segmento

30.- Siguiendo el mismo procedimiento se calcula la aproximación para el octavo segmento usando la tabla E.10. Haciendo los cálculos la función es:

$$p(x) = 93.3710 e^{-0.0692 x} \tag{E.15}$$

31.- Se hace una extrapolación para encontrar la distancia x para una potencia de 1.8 mW usando la ecuación E.15. Esta potencia es la medición que se tiene después de la octava reflexión (medición 64).

$$1.8 = 93.3710 e^{-0.0692 x}$$

$$x = (\ln(1.8/93.3710)) / -0.0692$$

$$x = 57.5$$

32.- Se encuentra la diferencia entre la distancia calculada D_{C8} y la distancia medida D_{M8} a 2.68 mW.

$$D_8 = D_{C8} - D_{M8}$$

$$D_8 = 57.5 - 23.94$$

$$D_8 = 33.56$$

33.- Se suma D_8 a las distancias de las 5 y ultimas mediciones (medición 64 a medición 68). Y se construye la tabla E.11.

i	(X_i)	$p(x_i)$	$\frac{P(X_i)}{\ln(p(x_i))}$	$(X_i)^2$	$\frac{X_i * P(X_i)}{X_i * \ln(p(x_i))}$
1	57.5	1.8	0.58778666	3306.25	33.7977332
2	57.75	1.75	0.55961579	3335.0625	32.3178118
3	58.25	1.72	0.54232429	3393.0625	31.5903899
4	58.75	1.69	0.52472853	3451.5625	30.8278011
m=5	59.25	1.66	0.5068176	3510.5625	30.0289429
Σ	291.5	8.62	2.72127287	16996.5	158.562679

Tabla E.11 Tabla usada para calcular la aproximación del noveno segmento

34.- Siguiendo el mismo procedimiento se calcula la aproximación para el noveno segmento usando la tabla E.11. Haciendo los cálculos la función es:

$$p(x) = 20.77 e^{-0.0426 x} \tag{E.15}$$

Usando la ecuación E.15 se hace una extrapolación para encontrar la distancia x para una potencia $P(x) = 1.66mW$ (mínima potencia detectable). La distancia calculada será la distancia máxima alcanzada por el enlace inalámbrico óptico punto a punto.

$$1.66 = 20.77 e^{-0.0426 x}$$

$$x = (\ln(1.66 / 20.77)) / -0.0426$$

$$x = 59.1 \text{ m}$$

La segunda aproximación queda definida de la siguiente manera:

$$P(x) = \begin{cases} 64.35 e^{-0.076 x} & 0.25 \leq x < 6.67 \\ 55.88 e^{-0.056 x} & 6.67 \leq x < 13.4 \\ 48.43 e^{-0.046 x} & 13.4 \leq x < 20.7 \\ 97.43 e^{-0.081 x} & 20.7 \leq x < 25.8 \\ 32.28 e^{-0.043 x} & 25.8 \leq x < 39.4 \\ 193.99 e^{-0.056 x} & 39.4 \leq x < 45 \\ 245.52 e^{-0.091 x} & 45 \leq x < 49.35 \\ 81.05 e^{-0.069 x} & 49.35 \leq x < 55 \\ 20.77 e^{-0.042 x} & x \geq 55 \end{cases} \quad \text{para} \quad (E.16)$$

En la figura E.3 podemos ver la gráfica de la segunda aproximación.

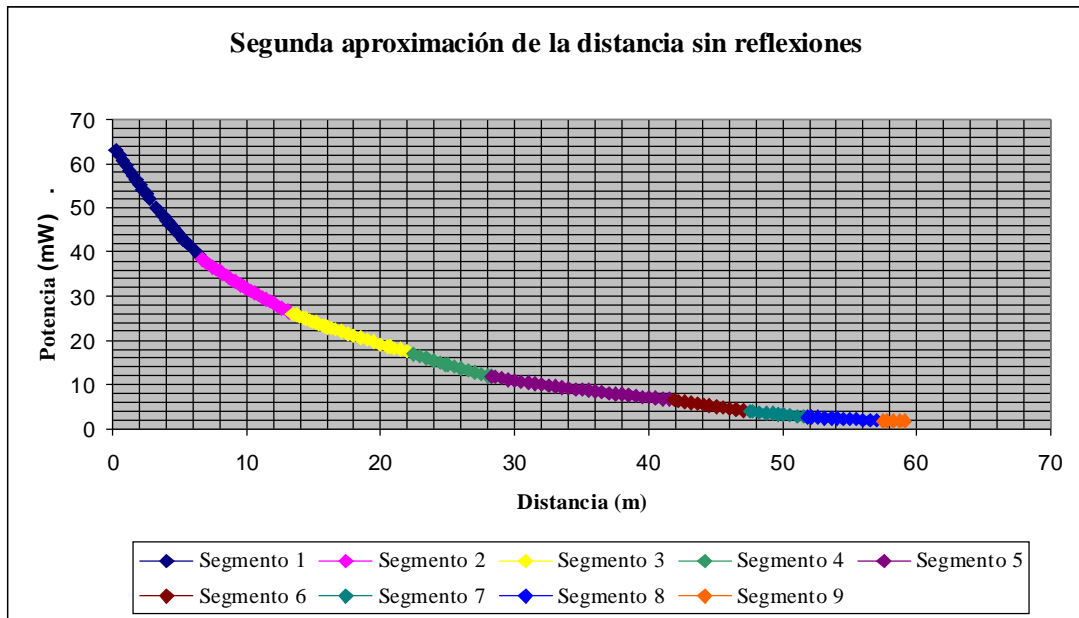


Figura E.3 Segunda aproximación de la distancia sin reflexiones

APÉNDICE F

DEMOSTRACIÓN VISUAL

Demostración visual del enlace inalámbrico óptico punto a punto y del enlace inalámbrico óptico punto a multipunto.