

Universidad Autónoma de Baja California



Facultad de Ingeniería - Ensenada



Sistema de comunicaciones ópticas por espacio libre

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener
el grado de

INGENIERO EN ELECTRÓNICA

PRESENTA

Benjamín Christian Juárez Terriquez

Ensenada, Baja California, Marzo del 2007.

TESIS DEFENDIDA POR

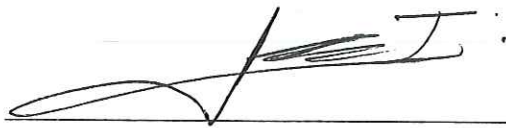
BENJAMIN CHRISTIAN JUAREZ TERRIQUEZ

Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITE



DR. MIGUEL ENRIQUE MARTINEZ ROSAS

DIRECTOR DE TESIS



DR. JUAN IVAN NIETO HIPOLITO

SINODAL



M.C. JUAN DE DIOS SANCHEZ LOPEZ

SINODAL

Ensenada, Baja California, Febrero del 2007

Agradecimientos

Quiero agradecerle a:

Mis padres por darme la oportunidad de estar aquí y saber que su esfuerzo no a sido en vano, a la niña Itta.

A mi abuelita Raquel donde quiera que estés, gracias por hacernos chocolate abuelita aunque comentaba que no nos dijeran que era de esa marca(no nos gustaba).

A mi Director de tesis y amigo Dr. Miguel Enrique por compartir su conocimiento conmigo y sobre todo por su paciencia durante este proyecto.

A la familia Araujo, Sr. German y Sra. Rosana, Orlando, Luis(wero) y German(Cebo) por ser mi segunda familia.

A Gaby por ser mi amiga, a mis compañeros de carrera Green, Adrian(manut) a todos ellos por compartir buenos momentos.

Al maestro Humberto Cervantes por su valiosa ayuda durante la carrera.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Justificación	3
1.3. Objetivo General	3
1.4. Objetivos específicos	3
2. Sistemas de Comunicación Digitales y Analógicos	5
2.1. Sistemas de Comunicación Analógicos	6
2.1.1. Ventajas del sistema de comunicación analógico	6
2.1.2. Desventajas del sistema de comunicación analógico	6
2.2. Sistemas de Comunicación Digital	7
2.2.1. Ventajas del sistema de comunicación digital	7
2.2.2. Desventajas del sistema de comunicación digital	8
3. Sistemas de Comunicación ópticos	9
3.1. Sistema de Transmisión-Recepción Analógico	9
3.1.1. Etapa de transmisión con LED infrarrojo	10
3.1.2. Etapa de recepción con fotodiodo	10
3.1.3. Etapa de preamplificación	10
3.1.4. Etapa de filtrado en el transmisor	12
3.1.5. Corrección del nivel de corriente directa	15
3.1.6. Amplificador de salida en configuración <i>push-pull</i>	17
3.1.7. Caracterización del sistema en función de la distancia del enlace	18
3.1.8. Circuito transmisor con amplificador diferencial	18
3.1.9. Cálculo de los elementos de la fuente de corriente con diodo zener	20
3.2. Sistema de Transmisión Recepción Digital	22

3.2.1. Filtro pasa-altas	23
3.3. Etapas del sistema de transmisión-recepción digital	25
3.3.1. Circuito de cerrojo (<i>latch</i>)	27
3.3.2. Conversión Paralelo-Serie	27
3.3.3. Conversión Serie-Paralelo	28
3.3.4. Sincronización del transmisor con el receptor	30
3.3.5. Señal de sincronía enviada por un canal dedicado	31
3.3.6. Efecto de la luz ambiente en la etapa de recepción	34
4. Pruebas y Resultados	36
4.1. Resultados obtenidos con el sistema analógico	36
4.1.1. Montaje de prueba con separación inferior a 1 cm	36
4.1.2. Montaje de prueba con separación de 4 cm	38
4.1.3. Montaje de prueba con separación de 7 cm	38
4.1.4. Montaje de prueba con separación de 10 cm	41
4.2. Resultados obtenidos con el sistema digital	42
4.2.1. Montaje de prueba con separación de 10 cm	42
4.2.2. Montaje de prueba con separación de 25 cm	43
4.2.3. Montaje de prueba con separación de 50 cm	43
4.2.4. Montaje de prueba con separación de 110 cm	47
5. Conclusiones	48
A. Cálculos de enlace	52
A.1. Cálculos de longitud de enlace	52
A.1.1. Emisor (LED)	54
A.1.2. Fototransistor	54
A.2. Calculo de pérdidas en el sistema analógico.	60
A.3. Calculo de pérdidas en el sistema digital	61

Índice de figuras

1.1. Evolución de las telecomunicaciones.	2
2.1. Esquema básico de un sistema de comunicaciones.	6
3.1. Transmisor óptico con LED Infrarrojo.	10
3.2. Señales medidas en el transmisor óptico con LED Infrarrojo.	11
3.3. Circuito receptor con fotodiodo.	11
3.4. Circuito de recepción con preamplificador.	12
3.5. Respuesta del preamplificador con ganancia modificada ($A_v = 100$).	13
3.6. Circuito receptor ajustado al ancho de banda requerido.	14
3.7. Reforzador empleado para mantener el nivel de señal requerido.	14
3.8. Circuito seguidor sumador con un potenciómetro para controlar el nivel de CD.	15
3.9. Diagrama completo del circuito receptor.	16
3.10. Etapa de potencia con amplificador tipo Push-Pull.	16
3.11. Preamplificador de entrada.	17
3.12. Diagrama del sistema Transmisor-Receptor completo.	18
3.13. Sistema de prueba de recepción a diferentes distancias con ayuda de un riel.	19
3.14. Circuito de excitación del transmisor en configuración amplificador diferencial.	19
3.15. Gráfica de potencia óptica <i>vs.</i> corriente del diodo láser.	21
3.16. Sistema analógico de Transmisión-Recepción óptica.	22
3.17. Gráfica de comportamiento del emisor óptico con fuente de corriente modificada.	23
3.18. Esquema del montaje empleado para la medición de la corriente de excitación del diodo Láser.	24
3.19. Comportamiento del láser con la fuente de corriente modificada.	25

3.20. diagrama del circuito receptor con un fototransistor.	26
3.21. Circuito propuesto por el fabricante para la utilización del circuito integrado ADC.	26
3.22. Circuito del ADC modificado.	27
3.23. Diagrama del circuito antirrebotes implementado.	29
3.24. Impulsos empleados para sincronizar el inicio de la transmisión y recepción de información.	30
3.25. Circuito de reloj implementado con el Amplificador Opera- cional <i>LM339</i>	31
3.26. Circuito Transmisor-Receptor para sistemas digitales con fibra óptica de plástico.	32
3.27. Fibra óptica de plástico.	32
3.28. Circuito comparador de voltaje a la salida del fototransistor. .	33
3.29. Circuito Transmisor-Receptor empleado en las pruebas a difer- entes distancias.	33
3.30. Circuito con modificación del voltaje de referencia.	34
3.31. Circuito Transmisor completo.	35
3.32. Receptor Digital Completo.	35
4.1. Montaje del sistema analógico con separación entre el trans- misor y el receptor menor a 1 cm.	37
4.2. Resultado del montaje del sistema analógico con separación entre el transmisor y el receptor menor a 1 cm.	37
4.3. Montaje del sistema analógico con separación entre el trans- misor y el receptor de 4 cm.	38
4.4. Resultado del montaje del sistema analógico con separación entre el transmisor y el receptor de 4 cm.	39
4.5. Montaje del sistema analógico con separación entre el trans- misor y el receptor de 7 cm.	39
4.6. Resultado del montaje analógico del sistema con separación entre el transmisor y el receptor de 7 cm.	40
4.7. Montaje del sistema analógico con separación entre el trans- misor y el receptor de 10 cm.	40
4.8. Resultado del montaje del sistema analógico con separación entre el transmisor y el receptor de 10 cm.	41
4.9. Montaje del sistema digital con separación entre el transmisor y el receptor de 10 cm.	42

4.10. Resultado del montaje del sistema digital con separación entre el transmisor y el receptor de 10 cm.	43
4.11. Montaje del sistema digital con separación entre el transmisor y el receptor de 25 cm.	44
4.12. Resultado del montaje del sistema digital con separación entre el transmisor y el receptor de 25 cm.	44
4.13. Montaje del sistema digital con separación entre el transmisor y el receptor de 50 cm.	45
4.14. Resultado del montaje del sistema digital con separación entre el transmisor y el receptor de 50 cm.	45
4.15. Montaje del sistema digital con separación entre el transmisor y el receptor de 110 cm.	46
4.16. Resultado del montaje del sistema digital con separación entre el transmisor y el receptor de 110 cm.	46
A.1. Gráfica ideal de la relación $P_{opt} - I_{in}$ del LED.	53
A.2. Gráfica ideal de la relación $I_{ph} - P_{opt}$ del fotodetector.	53
A.3. Voltaje de referencia.	54
A.4. Diagrama de conexión del LED.	55
A.5. Gráfica de respuesta <i>Intensidad radiada vs Corriente</i> del LED proporcionada por el fabricante.	56
A.6. Diagrama de conexión del Fototransistor.	57
A.7. Recta de carga del fototransistor en donde se muestra la región de saturación (la intensidad de iluminación sobre el fotodiodo es elevada) y el punto de operación Q (sin iluminar el dispositivo).	57
A.8. Curva de respuesta <i>Potencia óptica vs Corriente fotogenerada</i> del fototransistor proporcionada por el fabricante.	58
A.9. Curvas de salida del fototransistor a diferentes intensidades de iluminación proporcionada por el fabricante.	59
A.10. Gráfica de atenuación vs Distancia realizada en programa Matlab.	61
A.11. Gráfica de señales de entrada y salida vs Distancia realizada en programa Matlab.	62
A.12. Gráfica de atenuación (α [dB]) vs distancia realizada con el programa matlab.	63
A.13. Gráfica de voltaje de salida (V_{sal}) vs distancia realizada con el programa matlab.	63

Índice de tablas

3.1. Tabla de verdad del registro de corrimiento SN74LS165.	28
3.2. Tabla de verdad del circuito 74LS164.	29
A.1. Mediciones de señal eléctrica en el emisor y detector del sistema analógico en función de la distancia.	60
A.2. Mediciones de señal eléctrica detectada en el sistema digital con respecto a la distancia.	61

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

Una de las principales características que diferencian al hombre del resto de los animales es la habilidad de comunicarse con sus semejantes. En un principio la comunicación del hombre se basaba en señas y expresiones faciales. Posteriormente se desarrolló el habla, con este sistema de comunicación la cantidad de información que se enviaba del transmisor al receptor creció de manera muy considerable, sin embargo se tenía una barrera muy importante: la distancia (debido principalmente a que la voz el individuo transmisor aún cuando empleara el máximo volumen solo podía ser escuchada a una distancia de algunas decenas de metros), por otro lado cuando dos individuos de diferentes tribus o raza coincidían y trataban de comunicarse se encontraban con la barrera del idioma (es decir la manera en que estaba codificada la información era diferente para el transmisor y el receptor). Para poder cubrir mayores distancias se utilizaron señales de humo y tambores, sin embargo si se deseaba cubrir distancias aún más grandes era necesario escalar colinas o montañas de manera que la información fuera visible en sitios más lejanos.

Al paso del tiempo la evolución de la civilización dio origen a la escritura, por medio de cartas fue posible entonces enviar información sin límite de distancias, pero entonces el factor limitante para la comunicación fue el tiempo requerido para la recepción de la información. Al principio la distancia entre los puntos de origen y destino de la información era cubierta por corredores (heraldos), a medida que se requería reducir el tiempo para cubrir las distancias se modificaba el medio “portador” de información por sistemas más

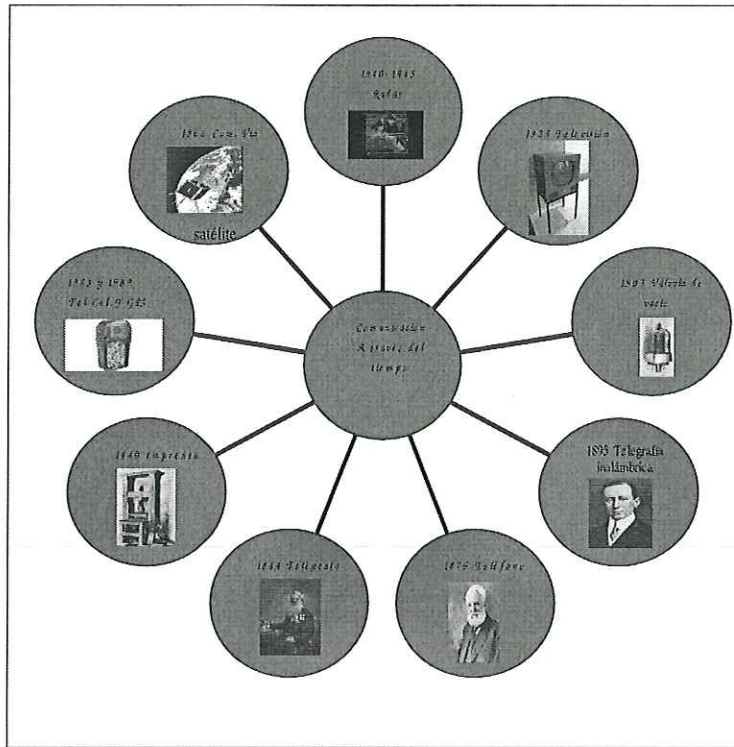


Figura 1.1: Evolución de las telecomunicaciones.

veloces (mensajeros a caballo, barco, tren, etc.). La comunicación humana dio un salto enorme a principios del siglo XIX, cuando se descubrió la electricidad y sus múltiples aplicaciones. Con la invención del telégrafo en 1844, el teléfono 1876 y con el descubrimiento de la radiocomunicación en 1895, se redujo dramáticamente el tiempo requerido para enviar y recibir mensajes por estos medios de telecomunicación. Básicamente se puede decir que los sistemas de telecomunicaciones modernos emplean “portadores” de información muy veloces, capaces de cubrir cualquier distancia entre dos puntos del planeta en fracciones de segundo. En la figura 1.1 se muestra la evolución de los sistemas o elementos que dieron origen a nuestros sistemas modernos de telecomunicaciones.

1.2. Justificación

Como se mencionó en párrafos anteriores, la necesidad del hombre por mantenerse comunicado mantiene una tendencia a incrementar la cantidad de información transmitida así como la distancia que debe cubrirse para que dicha información sea recibida. Por otro lado, el requerimiento respecto al tiempo de transferencia de la información cada vez es más restrictivo, es decir se busca que la comunicación sea instantánea. Los retos tecnológicos que se presentan para cumplir los requerimientos modernos de los sistemas de telecomunicaciones mantienen en una labor constante a los ingenieros y científicos para desarrollar sistemas más veloces y con mayor capacidad de manejo de información. Actualmente los sistemas de comunicación que transportan la mayor parte de la información (telefonía, datos, internet, etc.) están basados en sistemas ópticos, es por ello que la formación de un ingeniero en electrónica debe cubrir al menos los conceptos básicos de sistemas de comunicación ópticos tanto analógicos como digitales. El presente trabajo surgió precisamente de la necesidad de contar con plataformas didácticas en donde el alumno de ingeniería electrónica pudiera observar y manipular las características de los sistemas básicos de comunicaciones ópticas.

En las dos secciones siguientes se plantean los objetivos general y particulares de este trabajo de tesis.

1.3. Objetivo General

Diseñar y construir un sistema básico de comunicaciones ópticas por espacio libre para fines didácticos.

1.4. Objetivos específicos

- Diseñar y construir un sistema básico de comunicación óptica analógica.
- Diseñar y construir un sistema básico de comunicación óptica digital.
- Comparar el desempeño de ambos sistemas de comunicación en función de la distancia de enlace.

Este trabajo se divide en 5 capítulos:

Capítulo 1 En éste capítulo se da una breve introducción de la evolución de los sistemas de comunicación y se plantean los objetivos general y particulares de este trabajo.

Capítulo 2 En el capítulo 2 se presentan las definiciones básicas de los sistemas de comunicación analógicos y digitales, así como sus respectivas ventajas y desventajas.

Capítulo 3 En el capítulo 3 se describen con detalle las etapas de transmisión y recepción diseñadas y construidas para formar enlaces básicos de sistemas de comunicación óptica analógicos y digitales.

Capítulo 4 Las pruebas efectuadas a los sistemas de comunicación tanto analógico como digital y los resultados obtenidos están contenidos en el capítulo 4.

Capítulo 5 Finalmente, en el capítulo 5 se dan las conclusiones de este trabajo.

Capítulo 2

Sistemas de Comunicación Digitales y Analógicos

Un sistema de comunicación general esta compuesto por 3 elementos básicos: un transmisor, un canal de comunicación y un receptor (ver figura 2.1) además de los componentes básicos, es común incluir en la definición un protocolo y la codificación de la información. Para el caso de un sistema de comunicaciones electrónico, se pueden definir brevemente los tres elementos básicos de la manera indicada a continuación:

Transmisor Se puede definir como un conjunto de componentes y circuitos electrónicos diseñados para convertir la información de su forma original a una señal adecuada para que pueda enviarse a través de un medio de comunicación específico.

Canal Es el medio de comunicación a través del cual la señal electrónica se transporta de un lugar a otro, el canal puede consistir simplemente del espacio libre, cables de cobre, fibra óptica, etc.

Receptor Es un conjunto de componentes y circuitos electrónicos que reciben la señal proveniente del canal de comunicación (la cual contiene el mensaje transmitido), y la convierte al formato original para que pueda ser recuperado el mensaje.

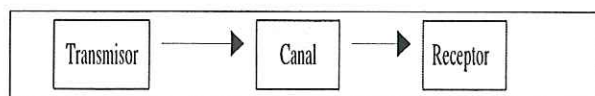


Figura 2.1: Esquema básico de un sistema de comunicaciones.

2.1. Sistemas de Comunicación Analógicos

Un sistema analógico es aquel en el que la información se transmite en forma analógica, en una señal de variación continua o como se menciona en el Diccionario de Ciencia y Tecnología [8]: *Cualquier forma de transmisión de información en donde una característica de la portadora de información de la señal transmitida (usualmente amplitud o frecuencia) es modificada de manera directamente proporcional a la variable que desea transmitirse (intensidad de sonido, brillantez luminosa, variación de temperatura, etc.)*

2.1.1. Ventajas del sistema de comunicación analógico

A continuación se enumeran algunas ventajas del sistema de comunicación analógico [7][6].

1. La amplificación de señales presenta menor distorsión armónica que un sistema digital.
2. La recuperación de la señal de información es más sencilla.
3. Dependiendo del tipo de modulación empleado los equipos requeridos para transmisión y recepción son relativamente sencillos.
4. Pasar la información de una frecuencia a banda base es más sencilla.
5. La directividad es menos restrictiva que para un sistema digital.
6. Debido a la sencillez de los equipos no requiere de demasiados componentes

2.1.2. Desventajas del sistema de comunicación analógico

1. La mayoría de los sistemas actuales operan en forma digital.

2. La actualización de los sistemas a esquemas modernos es complicada.
3. Su probabilidad de error es muy dependiente de los esquemas de modulación y esta muy ligada a la naturaleza de la señal.
4. Son muy susceptibles al ruido.
5. La información es difícil de manejar en sistemas conmutados (debe realizarse en tiempo real).
6. La detección de fallas en el sistema es complicada.

2.2. Sistemas de Comunicación Digital

Un sistema de comunicación digital, utiliza un tipo de codificación en el cual las señales poseen únicamente valores discretos, en el caso más común llamado *binario* se emplean simplemente dos niveles conocidos como nivel “1” y “0” (para el caso de la familia lógica TTL que se emplea en este trabajo, “1” corresponde a 5 volts y “0” a 0 volts). Tomando la definición del Diccionario de Ciencia y Tecnología [8], un sistema de comunicación digital se define como: *Circuitos de comunicación, en los cuales la información es transmitida en forma de trenes de impulsos, en el caso de señales de voz o imágenes, es necesario hacer una conversión de código de dicha información, de manera que pueda ser enviada de forma adecuada (por ejemplo en el caso de modulación por impulsos codificados PCM -por sus siglas en inglés-), aunque actualmente muchos datos están disponibles para su transmisión de manera inmediata.*

Generalmente, la señal de la fuente de información es analógica, por lo que debe convertirse al formato digital por medio de dispositivos convertidores analógico-digitales (A/D) antes de ser transmitida. Después de enviar la información a través del canal, es necesario recuperar el mensaje original en el receptor, por lo que la señal recibida se inyecta a un circuito convertidor digital-analógico (D/A) y se obtiene a su salida la señal analógica original.

2.2.1. Ventajas del sistema de comunicación digital

A continuación se enumeran algunas de las ventajas que presenta un sistema de comunicación digital [6]:

CAPÍTULO 2. SISTEMAS DE COMUNICACIÓN DIGITALES Y ANALÓGICOS

1. La relativa simplicidad del diseño de circuitos digitales.
2. La facilidad con la cual se pueden aplicar técnicas de circuitos integrados a circuitería digital.
3. El incremento constante y disponibilidad de técnicas de procesamiento digital.
4. La extensa utilización de computadoras para manejo de datos.
5. La habilidad de codificar señales digitales para minimizar los efectos de ruido e interferencia.
6. Posibilidad de hacer conmutación electrónica de manera relativamente sencilla.

2.2.2. Desventajas del sistema de comunicación digital

1. El ancho de banda es costoso y muy limitado
2. Requiere de circuitos especiales.
3. La sincronización debe ser muy precisa entre los relojes del transmisor y el receptor.
4. Los sistemas digitales son incompatibles con las instalaciones de sistemas analógicos anteriores.
5. La directividad es más restrictiva en el apuntamiento que para un sistema analógico.

Capítulo 3

Sistemas de Comunicación ópticos

Un sistema de comunicaciones ópticas, es un sistema en el cual se transmite la información (en forma de luz) a través del espacio libre (luz que viaja por el aire) o confinada en una fibra óptica, la señal puede ser analógica o digital. Estos sistemas en general están compuestos de varios componentes de transmisión y recepción, la etapa de transmisión los dispositivos emisores, es decir los elementos que convierten la señal eléctrica en señal luminosa son diodos emisores de luz (LEDs) infrarrojos o diodos Laser. Para la etapa de recepción se emplean fotodiodos del tipo PIN o de avalancha, así como fototransistores como elementos conversores de señales luminosas a señales eléctricas.

3.1. Sistema de Transmisión-Recepción Analógico

En esta sección se describe el diseño y la construcción de los sistemas de transmisión-recepción. En primer lugar se implementó el circuito transmisor analógico con un LED infrarrojo (OPE5194WK), la configuración utilizada se muestra en la figura 3.1.

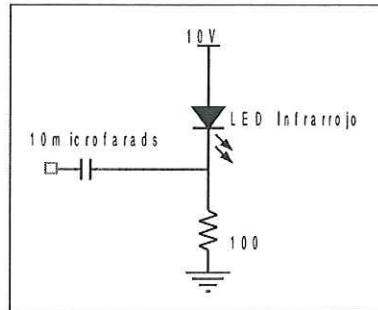


Figura 3.1: Transmisor óptico con LED Infrarrojo.

3.1.1. Etapa de transmisión con LED infrarrojo

Para probar la capacidad del transmisor se procedió a inyectar una señal sinusoidal, las señales de entrada y salida se midieron con el osciloscopio y se obtuvieron las formas de onda mostradas en la Figura 3.2.

3.1.2. Etapa de recepción con fotodiodo

En la etapa de recepción se utilizó un fotodiodo PNZ323B del fabricante Panasonic, el diagrama de conexión se muestra en la figura 3.3. Durante las pruebas del mencionado circuito se observó que la señal era muy débil, por lo que se decidió emplear un amplificador operacional como preamplificador, para este fin fue seleccionado el amplificador operacional comercial MC1458. Tal dispositivo es un circuito integrado (CI) que contiene dos amplificadores operacionales en un solo encapsulado. El diagrama del circuito implementado se observa en la figura 3.4.

3.1.3. Etapa de preamplificación

Para poder calcular la ganancia de un amplificador operacional empleado como amplificador no inversor se utiliza la fórmula mostrada en la ecuación 3.1.

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_f}{R_1} \quad (3.1)$$

Para obtener una ganancia A_v de 100 se tiene:

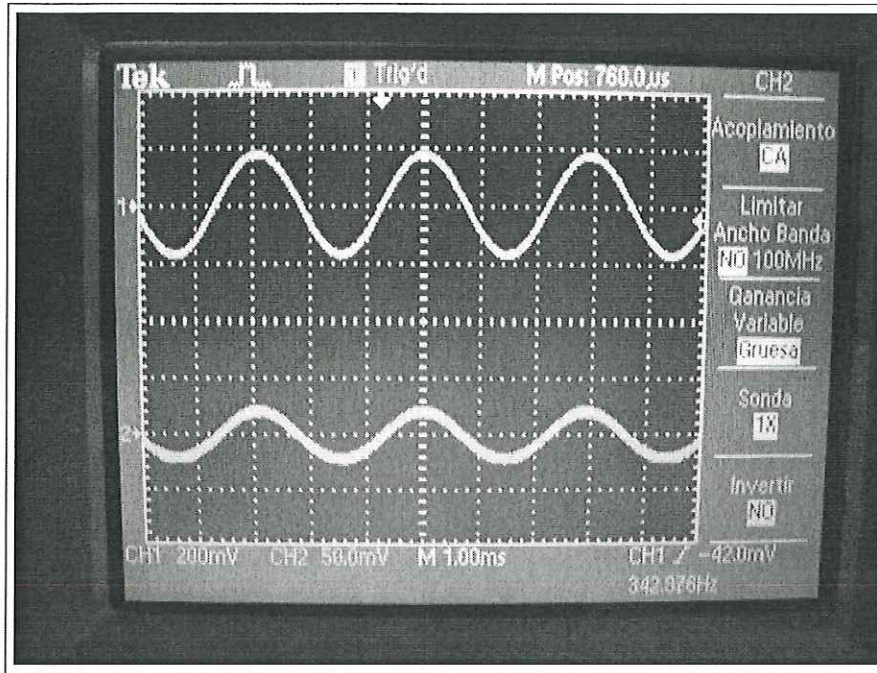


Figura 3.2: Señales medidas en el transmisor óptico con LED Infrarrojo.

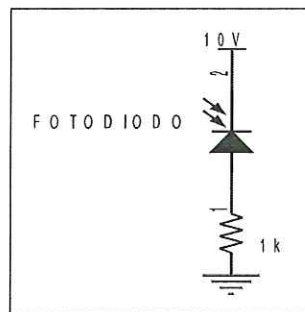


Figura 3.3: Circuito receptor con fotodiodo.

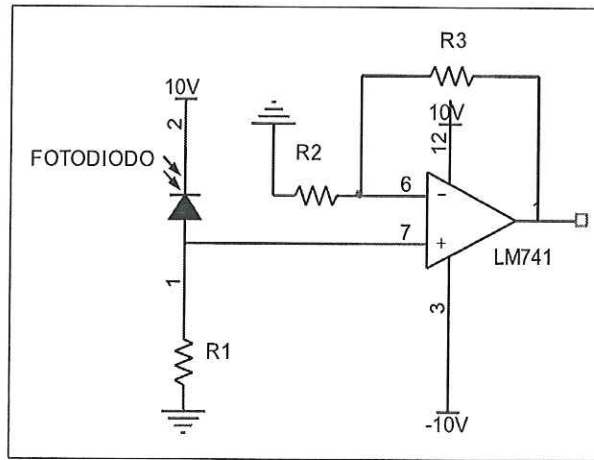


Figura 3.4: Circuito de recepción con preamplificador.

$$A_v = 1 + \frac{10 \text{ k}\Omega}{100 \Omega} = 101 \quad (3.2)$$

Con la ganancia elegida se amplifica la señal que se recibe en el fotodiodo hasta un nivel adecuado para su utilización, la señal obtenida después de la etapa de amplificación se muestra en la Fig. 3.5.

Como puede observarse, la señal obtenida es de 100 mV y tiene un desfase con respecto a la señal de entrada. Debido al nivel de DC con el que se alimenta al fotodiodo, existe una señal de desbalance que se inyecta al amplificador operacional, la señal recibida por lo tanto se degrada hasta el punto de ser ininteligible. Por consiguiente, es necesario hacer uso de un filtro del tipo pasa-altas para poder recuperar la señal transmitida y eliminar el efecto del nivel de desbalance.

3.1.4. Etapa de filtrado en el transmisor

Para la implementación del filtro pasa-altas se necesita conocer la frecuencia de corte f_c (para este caso inferior) a la que debe operar el circuito. A partir de dicha frecuencia y si se emplea un filtro de primer orden del tipo RC , se propone un valor comercial disponible para uno de los elementos que componen el filtro y entonces se calcula el valor de la resistencia, o el capacitor correspondiente a la frecuencia de corte. Puesto que se está trabajando

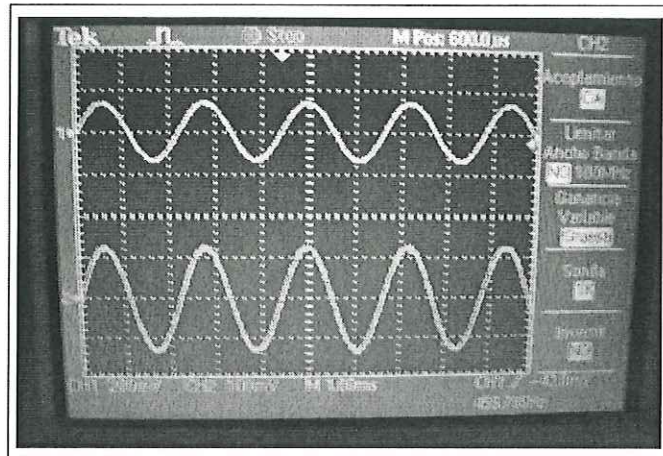


Figura 3.5: Respuesta del preamplificador con ganancia modificada ($A_v = 100$).

con el ancho de banda de la voz (20 Hz hasta 20 KHz), se elige una frecuencia de corte inferior de 20 Hz y una resistencia de 1 K Ω , entonces partiendo de la formula 3.3:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3.3)$$

Despejando C :

$$C = \frac{1}{2\pi f_c R} \quad (3.4)$$

Empleando la ecuación 3.4 se obtiene como resultado un capacitor de 8 μF , pero debido a que estos valores de capacitancia son difíciles de encontrar comercialmente, se emplea una aproximación a una f_c de 16Hz y un capacitor de 10 μF . Manteniendo el mismo valor de resistencia R se obtiene un circuito cuyo diagrama es mostrado en la figura 3.6.

Para asegurar que la señal mantenga un nivel adecuado se utiliza un reforzador, el cual es implementado por medio un amplificador operacional empleando una configuración como la mostrada en la figura 3.7.

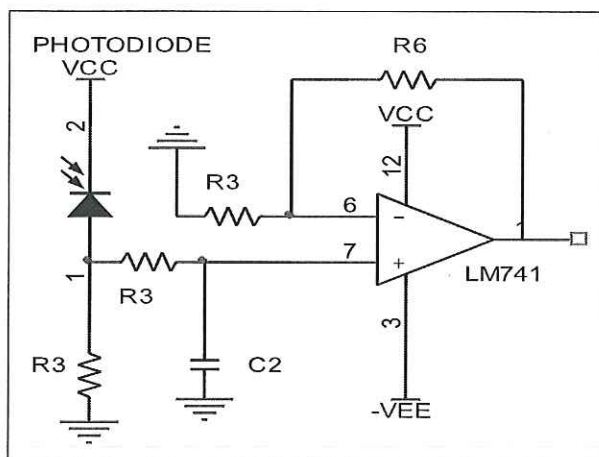


Figura 3.6: Circuito receptor ajustado al ancho de banda requerido.

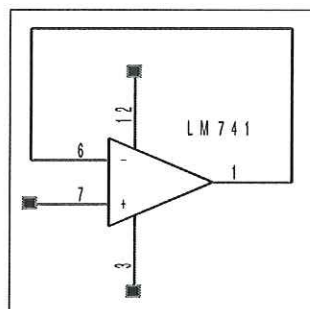


Figura 3.7: Reforzador empleado para mantener el nivel de señal requerido.

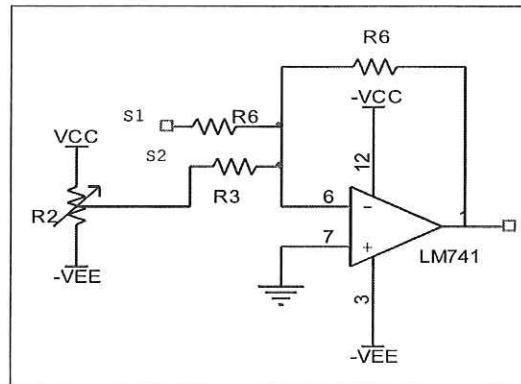


Figura 3.8: Circuito seguidor sumador con un potenciómetro para controlar el nivel de CD.

3.1.5. Corrección del nivel de corriente directa

Debido al nivel de luz ambiente, la cual se recibe en el dispositivo detector y se interpreta como una señal de ruido fue necesario emplear un circuito de ajuste por medio de un potenciómetro de $10\text{ K}\Omega$ seguido de un sumador (Fig. 3.8). Este circuito de corrección, permitirá que no se tenga un nivel de *offset* y por lo tanto se podrá mantener la señal de información sin saturar la salida.

Este sistema óptico Transmisor-Receptor, dio resultados de desempeño (distancia de enlace) muy por debajo de los valores deseados, por lo que se decidió probar otro sistema, el cual sin embargo tomó como base el diseño del sistema anterior.

Para el nuevo sistema se consideró el uso de etapas sucesivas de amplificación, pero se observaron problemas de desbalance de corriente directa entre la 1a y 2a etapas de amplificación por lo cual se utilizó un capacitor para acoplar dichas etapas, así como un potenciómetro para poder ajustar la ganancia. El diagrama del circuito final queda de la manera mostrada en la Fig. 3.9.

Para optimizar la respuesta del sistema se empleó un amplificador de potencia a su salida utilizando los transistores complementarios TIP31 y TIP32, en configuración *push-pull* (Ver figura 3.10).

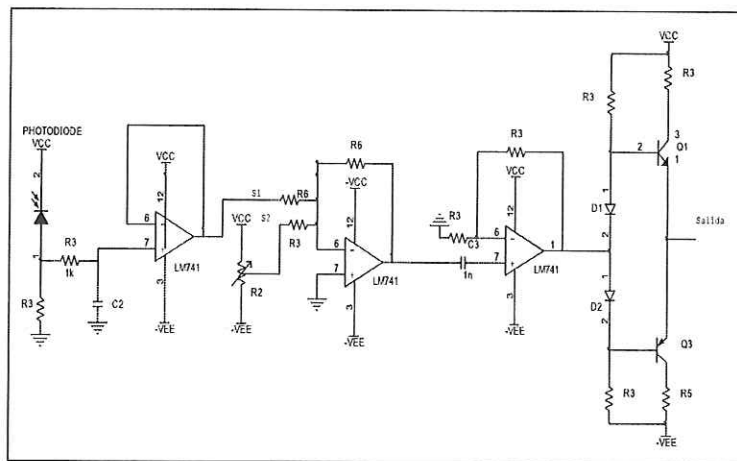


Figura 3.9: Diagrama completo del circuito receptor.

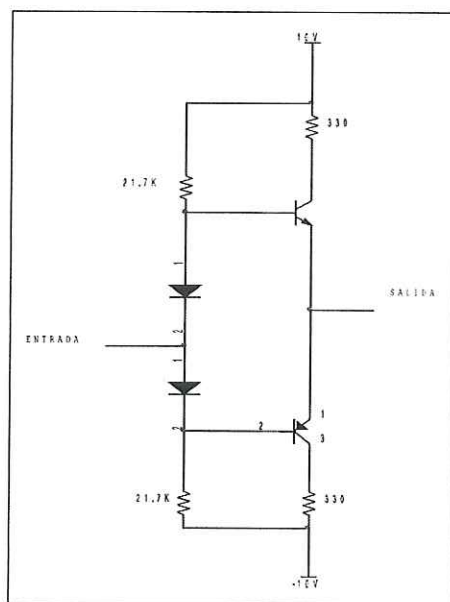


Figura 3.10: Etapa de potencia con amplificador tipo Push-Pull.

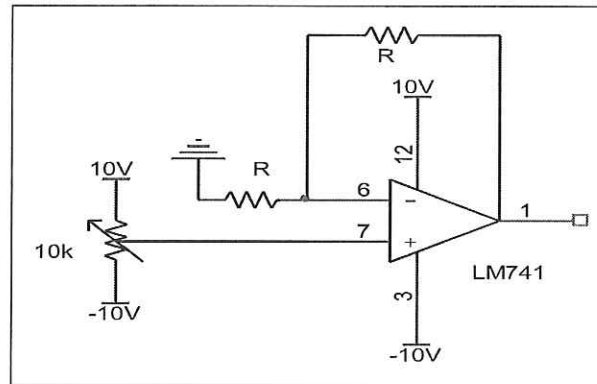


Figura 3.11: Preamplificador de entrada.

3.1.6. Amplificador de salida en configuración *push-pull*

El cálculo de los valores de componentes del amplificador de salida en configuración *push-pull* se realizó empleando la fórmula 3.5, considerando $\beta = h_{FE} = 70$.

$$V_{CC} = I_B R_B + V_{BE} + I_C \quad (3.5)$$

Obteniendo los siguientes valores:

- $I_C = 30 \text{ mA}$
- $I_B = 0.42 \text{ mA}$
- $R_B = 21.57 \text{ K}\Omega$

Para mejorar la ganancia se optó por eliminar el potenciómetro, con lo cual se incrementó el volumen de salida de la señal. La corrección del desbalance se logró por medio de un preamplificador de entrada, como se muestra en la Fig. 3.11.

El circuito final con la respuesta optimizada se muestra en la figura 3.12.

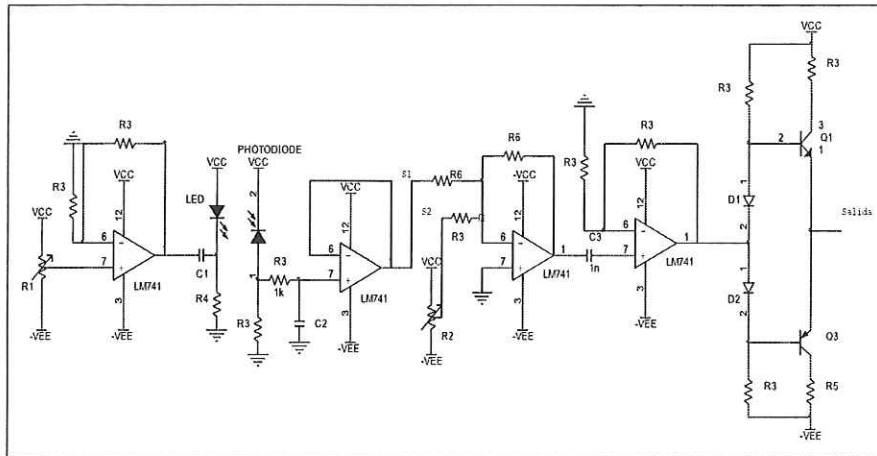


Figura 3.12: Diagrama del sistema Transmisor-Receptor completo.

3.1.7. Caracterización del sistema en función de la distancia del enlace

Puesto que el desempeño del sistema de Transmisión-Recepción depende de la distancia del enlace, fue necesario que los elementos emisor (LED infrarrojo) y detector (fotodiodo) se montaran sobre un riel (ver esquema del montaje en la Fig. 3.13), de manera que se pudiera caracterizar el comportamiento del sistema a diferentes distancias sin modificar de manera apreciable el apuntamiento óptico entre los extremos del Transmisor y el Receptor.

3.1.8. Circuito transmisor con amplificador diferencial

Posteriormente, se reemplazó el circuito manejador del LED por medio de un circuito del tipo amplificador diferencial con fuente de corriente constante (ver Figura 3.14), de manera que la señal de información modificara de manera directa la corriente que circula a través del LED, en lugar del voltaje como se realizaba en el circuito anterior. Esta modificación se realizó por considerar que el LED es un dispositivo cuya potencia óptica de salida es una función directa de la corriente que circula a través de él.

Para implementar este nuevo circuito manejador es necesario hacer cálculos que nos permitan emplear los valores adecuados de las resistencias R_E y R_Z . Utilizando la ecuación 3.6

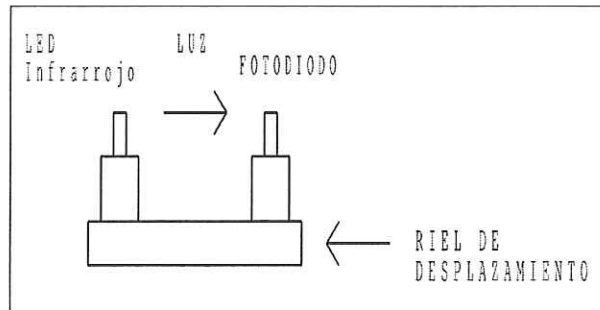


Figura 3.13: Sistema de prueba de recepción a diferentes distancias con ayuda de un riel.

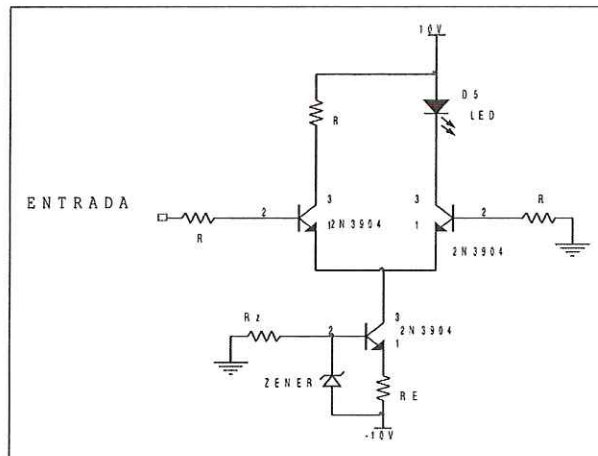


Figura 3.14: Circuito de excitación del transmisor en configuración amplificador diferencial.

$$I_E = \frac{(V_Z - V_{BE})}{R_E} \quad (3.6)$$

Se tiene:

$$I_E = \frac{(5.6 - 0.7)V}{2 \text{ K}\Omega} = 2.45 \text{ mA} \quad (3.7)$$

$$I_C = \frac{I_E}{2} = \frac{2.45 \text{ mA}}{2} = 1.225 \text{ mA} \quad (3.8)$$

3.1.9. Cálculo de los elementos de la fuente de corriente con diodo zener

Para mantener el voltaje de referencia proporcionado por el diodo zener, es necesario conservar la corriente que circula por dicho diodo a un nivel inferior al correspondiente a su potencia máxima de operación (especificada por el fabricante). Puesto que la corriente del diodo zener es controlada básicamente por la resistencia R_Z , es necesario conocer en primer lugar los valores límites de operación del dispositivo, los datos proporcionados por el fabricante se muestran a continuación:

- $P_{Z_{max}} = \frac{1}{4} \text{ W}$
- $V_Z = 5.6 \text{ V}$

Por lo tanto el valor máximo de corriente permitido a través del diodo zener se obtiene de la ecuación 3.9:

$$P_{Z_{max}} = I_{Z_{max}} V_Z \quad (3.9)$$

despejando $I_{Z_{max}}$, se tiene:

$$I_{Z_{max}} = \frac{P_{Z_{max}}}{V_Z} = \frac{0.25\text{W}}{5.6\text{V}} = 44.64 \text{ mA} \quad (3.10)$$

Como se desea que el zener opere debajo de su potencia límite, se elige una corriente $I_Z = 20 \text{ mA}$ y se calcula el valor de R_Z por medio de la ecuación 3.11.

$$R_Z = \frac{V_{EE} - V_Z}{I_Z} = \frac{(10 - 5.6) \text{ V}}{20 \text{ mA}} = 245 \Omega \quad (3.11)$$

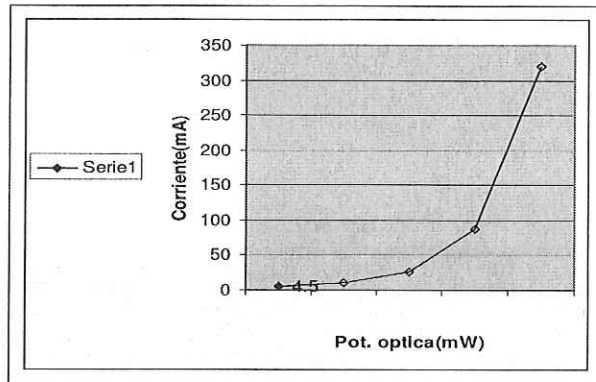


Figura 3.15: Gráfica de potencia óptica *vs.* corriente del diodo láser.

El valor de R_Z obtenido (245Ω) no está disponible en valores comerciales, por lo que se utiliza una resistencia de 220Ω , con lo cual la corriente de zener varía a 22.77 mA . Las modificaciones realizadas a la fuente de corriente dieron como resultado que el volumen y la calidad del sonido de salida mejoraran.

La mejora en el desempeño del transmisor óptico se justifica por la característica de conversión de corriente eléctrica en potencia óptica del LED. La relación de potencia óptica proporcionada por el LED con respecto a la corriente inyectada al mismo se muestra en la figura 3.15.

El sistema funciona de manera adecuada a una distancia muy reducida, al aumentar la distancia de separación entre el emisor y el receptor ópticos la señal detectada disminuye hasta perderse. La modificación de la distancia de separación entre el LED y el fotodiodo montados sobre el riel no modificó apreciablemente el apuntamiento de los dispositivos ópticos, por lo que la degradación de la señal se debió únicamente a la distancia que separaba dichos componentes. Para mejorar la detección del receptor se cambió la forma de la señal de entrada a una forma de onda cuadrada para emular una señal digital, en este caso se mejoró visiblemente la respuesta del receptor en función de la distancia comparada con la respuesta del receptor a la señal *analógica*. El desempeño del receptor depende también de la ganancia del amplificador, por lo que se cambió dicha ganancia de 1 a 100. El diagrama del circuito final se muestra en la figura 3.16.

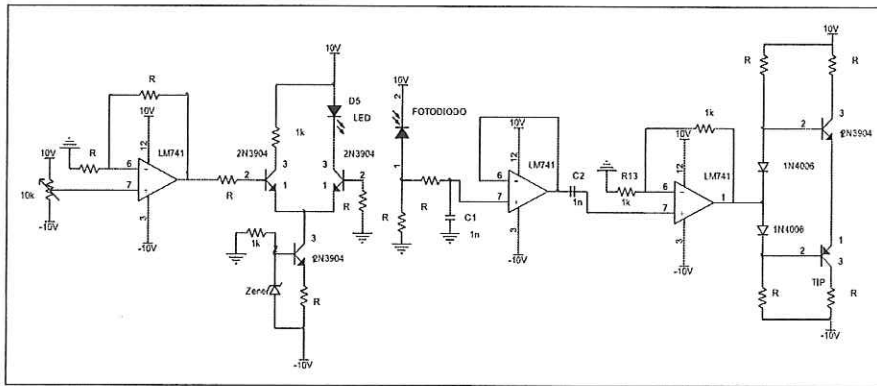


Figura 3.16: Sistema analógico de Transmisión-Recepción óptica.

3.2. Sistema de Transmisión Recepción Digital

Para implementar el sistema digital es necesario en primer lugar hacer una conversión de la señal analógica (por ejemplo la voz humana) a una señal digital, para este propósito se emplea el convertidor analógico/digital (A/D) comercial ADC0804. Este circuito A/D opera a baja frecuencia por lo que su aplicación no es la más adecuada para aplicaciones de voz, en donde el ancho de banda analógico requerido es de varios KHz, sin embargo, debido a limitaciones presupuestales, dicho circuito es el único que se tuvo disponible para este trabajo.

Debido a las características de la señal digital (para este trabajo se emplea lógica TTL) fue necesario realizar algunas modificaciones en el circuito transmisor, en particular se modificó la fuente de corriente. Para la fuente de corriente del circuito transmisor se modificó la corriente al valor indicado en la expresión 3.12:

$$I_E = \frac{(V_Z - V_{BE})}{R_E} = \frac{(5.6 - 0.7) \text{ V}}{1 \text{ K}\Omega} \quad (3.12)$$

Las corrientes y el valor R_E para el amplificador diferencial se obtienen a partir de la ecuación 3.13.

$$I_E = \frac{(V_{CC} - V_{BE})}{R_E} = \frac{(10 - 0.7) \text{ mA}}{2 \text{ K}\Omega} = 4.65 \text{ mA} \quad (3.13)$$

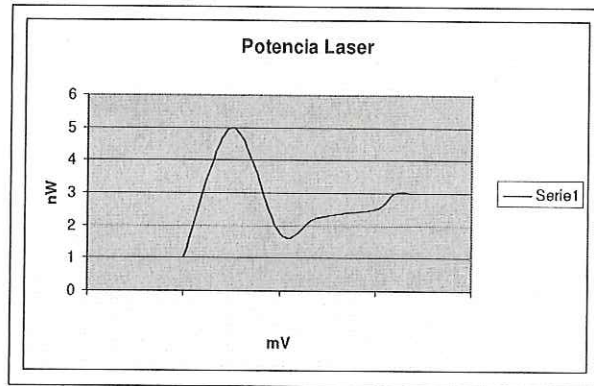


Figura 3.17: Gráfica de comportamiento del emisor óptico con fuente de corriente modificada.

$$I_C = \frac{(I_E)}{2} = \frac{(4.65) \text{ mA}}{2} = 2.32 \text{ mA} \quad (3.14)$$

La gráfica de potencia de salida óptica con respecto a la corriente inyectada empleando la nueva fuente de corriente se muestra en la figura 3.17.

3.2.1. Filtro pasa-altas

Durante esta etapa de la aplicación del sistema, se utilizó un filtro pasa-altas para pruebas de operación en bajas frecuencias del sistema, ya que se pretende utilizar voz en el sistema cuyo ancho de banda va de 20 Hz a 20 KHz.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3.15)$$

Se eligió la frecuencia de 100 Hz debido que se considera una frecuencia relativamente baja y se está utilizando un convertidor Analógico/Digital que opera en bajas frecuencias. Como la idea es trabajar este sistema con un diodo laser, con este filtro se pretende mejorar la funcionalidad del sistema.

Despejando el parámetro R se tiene:

$$R = \frac{1}{2\pi f_c RC} \quad (3.16)$$

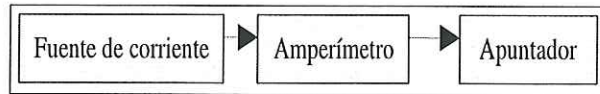


Figura 3.18: Esquema del montaje empleado para la medición de la corriente de excitación del diodo Láser.

Obteniendo como resultado una resistencia de 154Ω , debido a que este valor no es comercial se utilizó una resistencia de valor aproximado, el filtro es implementado entre el fotodiodo y el reforzador del sistema.

El sistema proporciona una respuesta con mayor fidelidad de salida. Sin embargo, para aumentar el alcance del enlace se propuso cambiar el dispositivo emisor, es decir reemplazar el LED por un diodo Láser, con tal propósito se modificó un apuntador láser para enviar la información de audio y hacer pruebas comparativas. El diodo láser se conectó a la fuente de corriente constante y para poder monitorear la corriente empleada para obtener una potencia óptica de salida específica se utilizó un amperímetro de la manera indicada en el esquema de la Fig. 3.18.

Debido a que los diodos láser son dispositivos muy sensitivos a la corriente, es muy fácil dañarlos, por lo tanto, es muy importante controlar la potencia de salida del apuntador. Con el fin de mantener en operación al diodo láser de manera segura, se modificaron los parámetros de la fuente de corriente siguiendo la ley de Ohm: $V = IR$. Despejando R y sustituyendo valores se obtuvieron los siguientes parámetros:

- $I_Z = 20 \text{ mA}$
- $R_Z = 220 \Omega$
- $I_E = 50 \text{ mA}$
- $R_E = 100 \Omega$
- $V_{CC} = 10 \text{ V}$

En la gráfica de la Fig. 3.19 se muestra la respuesta del diodo láser con la fuente de corriente modificada. Se puede observar un comportamiento ligeramente más lineal.

La potencia óptica del láser se midió con ayuda de un medidor de potencia óptica. El valor medido cuando el diodo láser se excita únicamente con la

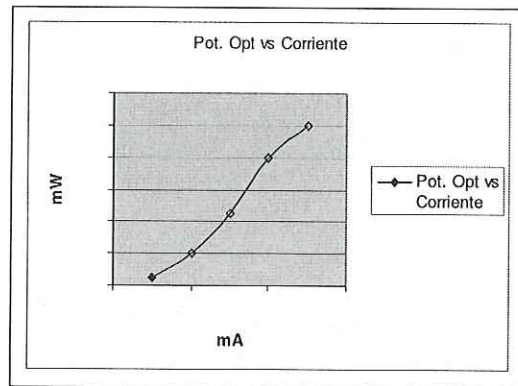


Figura 3.19: Comportamiento del láser con la fuente de corriente modificada.

corriente de reposo (punto de operación de potencia media) es de $I_Q = 25.9$ nW.

Debido a las fallas y la poca potencia óptica de transmisión se optó por cambiar de componentes. Para el receptor óptico se utilizó un fototransistor óptico (PT1302B de Everlight) cuya base es controlada por la luz que recibe el dispositivo. El diagrama del circuito receptor con fototransistor se muestra en la Figura 3.20.

3.3. Etapas del sistema de transmisión-recepción digital

Debido a que el desarrollo del sistema de transmisión-recepción se llevó a cabo por etapas, cada una de ellas se implementó y probó de manera independiente, de tal forma que se redujeron los errores de diseño y ensamble.

Para implementar la etapa de conversión se partió de la configuración especificada en la hoja de datos del circuito integrado (CI) convertidor Analógico/Digital (ADC). El diagrama propuesto por el fabricante se muestra en la Figura 3.21. A partir del circuito propuesto se hicieron los cambios que se muestran en la figura 3.22.

Como se puede observar en el diagrama del circuito, se eliminó el botón de conversión (switch). Por otro lado, se inyectó un nivel de voltaje controlado por un potenciómetro a la entrada del convertidor y la salida del mismo se

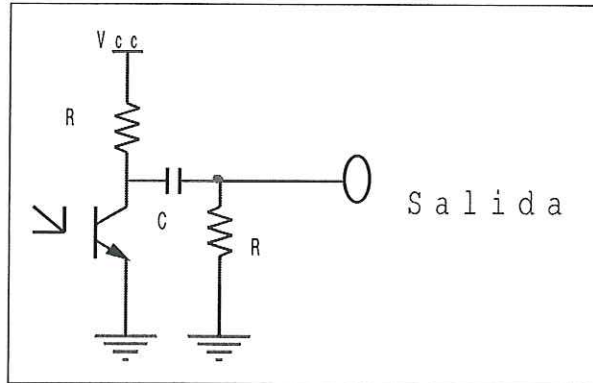


Figura 3.20: diagrama del circuito receptor con un fototransistor.

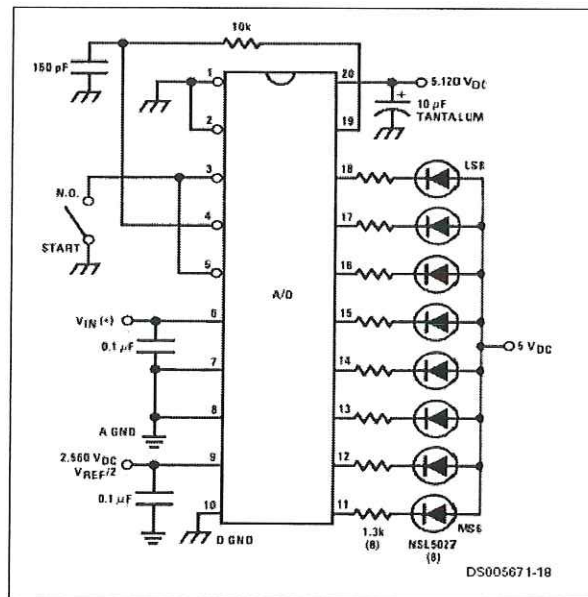


Figura 3.21: Circuito propuesto por el fabricante para la utilización del circuito integrado ADC.

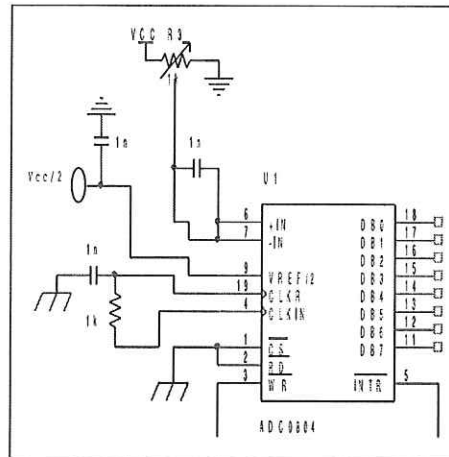


Figura 3.22: Circuito del ADC modificado.

verificó con LEDs, de tal manera que se pudiera ver la respuesta del circuito a los cambios de voltaje en la entrada.

3.3.1. Circuito de cerrojo (*latch*)





Una vez que el ADC funcionó de la manera correcta se agregó un circuito de cerrojo (LATCH) con el circuito integrado *SN74LS373*.

3.3.2. Conversión Paralelo-Serie

Finalmente se emplea un registro de corrimiento para hacer la conversión paralelo-serie. El registro de corrimiento *SN74LS165* se configuró empleando la tabla de verdad que se observa en el cuadro 3.1.

La sincronización del transmisor y el receptor se logra por medio de impulsos de sincronización, los cuales son utilizados para indicarle a los circuitos de conversión analógica-digital y digital-analógica cuando inician y cuando terminan los ciclos de conversión. Los impulsos mencionados se obtienen por medio de un contador de 4 bits, al cual se le inyecta la señal del reloj maestro del sistema.

La operación adecuada del DAC requiere de un manejo cuidadoso de tierras y filtrado en las alimentaciones, además de que los niveles inyectados

TRUTH TABLE											
PL	CP		CONTENTS								RESPONSE
	1	2	Q ₀	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆	Q ₇	
L	X	X	P ₀	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	Parallel Entry
H	L		D _S	Q ₀	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆	Right Shift
H	H		Q ₀	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆	Q ₇	No Change
H		L	D _S	Q ₀	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆	Right Shift
H		H	Q ₀	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆	Q ₇	No Change

H = HIGH Voltage Level
L = LOW Voltage Level
X = Immaterial

Tabla 3.1: Tabla de verdad del registro de corrimiento SN74LS165.

deben corresponder al nivel estándar para las señales digitales correspondientes a los valores 1 y 0 en lógica *TTL*.

Al acoplar todas las etapas del sistema fue necesario agregar circuitos antirrebotes para evitar señales digitales falsas, las cuales se interpretan como señales de ruido. El circuito antirrebotes utilizado se implemento con dos compuertas conectadas con realimentación, tal como se muestra en la figura 3.23.

La señal digital en formato *serie* se inyecta directamente al emisor óptico y la comunicación se realiza por espacio libre, en el receptor la luz que recibe el fototransistor es convertida a señal eléctrica nuevamente y posteriormente debe ser acomodada en formato *paralelo* para su posterior conversión en señal analógica.

3.3.3. Conversión Serie-Paralelo

La conversión serie-paralelo se efectúa por medio del CI 74LS164. La configuración del 74LS164 se lleva a cabo empleando la tabla lógica que se observa en el cuadro 3.2.

Para el receptor se emplea otro *LATCH* 74373 de forma que los datos se mantengan disponibles para su conversión. Los impulsos empleados para sincronizar el transmisor con el receptor se muestran en la figura 3.24.

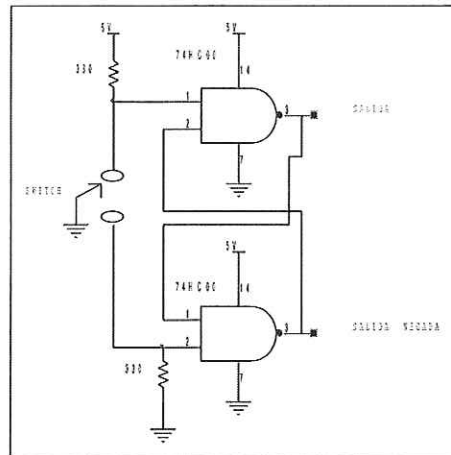


Figura 3.23: Diagrama del circuito antirrebotes implementado.

MODE SELECT — TRUTH TABLE					
OPERATING MODE	INPUTS			OUTPUTS	
	MR	A	B	Q ₀	Q ₁ -Q ₇
Reset (Clear)	L	X	X	L	L - L
Shift	H	l	l	L	q ₀ - q ₆
	H	l	h	L	q ₀ - q ₆
	H	h	l	L	q ₀ - q ₆
	H	h	h	H	q ₀ - q ₆

L (l) = LOW Voltage Levels
H (h) = HIGH Voltage Levels
X = Don't Care
q_n = Lower case letters indicate the state of the referenced input or output one set-up time prior to the LOW to HIGH clock transition.

Tabla 3.2: Tabla de verdad del circuito 74LS164.

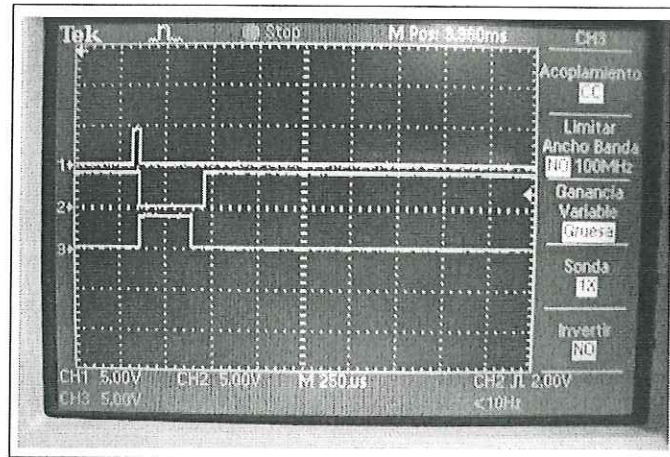


Figura 3.24: Impulsos empleados para sincronizar el inicio de la transmisión y recepción de información.

En el contador se calculan los impulsos para que cada 8 ciclos se genere un pulso de activación por medio de la formula 3.17:

$$T_w = kR_x C_x \quad (3.17)$$

El coeficiente k se indica en la hoja de especificaciones del componente. Despejando C_x , se obtiene:

$$C_x = \frac{T_w}{kR_x} = 1 \text{ pF} \quad (3.18)$$

3.3.4. Sincronización del transmisor con el receptor

Una vez calculado el ancho de los impulsos, hay que sincronizar las dos partes para evitar fallas tanto en el transmisor como en el receptor. Tomando como referencia el impulso del *LATCH* en el transmisor se configura el impulso para el *LATCH* del receptor. Para modificar el ancho y retardo de los impulsos, se utilizó un circuito monoestable 74LS123.

Tanto para el transmisor como para el receptor, se utilizó originalmente un generador de funciones como reloj. Para el circuito final se emplea como reloj un amplificador operacional LM339 con histéresis en una configuración

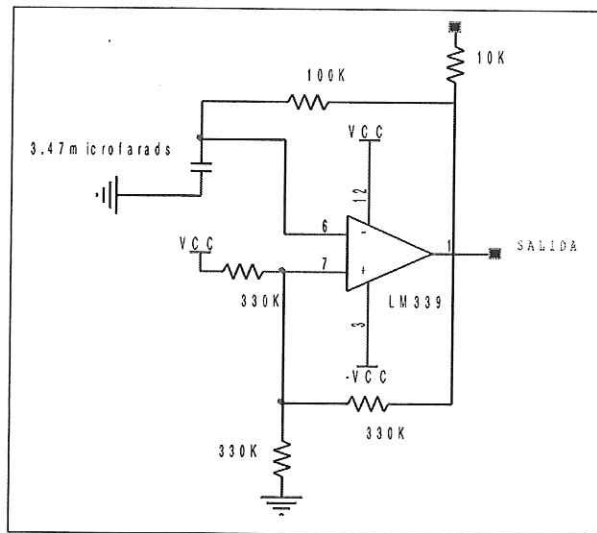


Figura 3.25: Circuito de reloj implementado con el Amplificador Operacional LM339.

de oscilador con salida de forma cuadrada, el circuito se muestra en la figura 3.25.

3.3.5. Señal de sincronía enviada por un canal dedicado

Después de comprobar el funcionamiento adecuado del receptor, se agregaron dos fibras ópticas de plástico con circuitos regeneradores de señal integrados para probar la transmisión de datos, El módulo empleado y la fibra óptica de plástico se muestran en las figuras 3.26 y 3.27 respectivamente:

En el montaje del LED infrarrojo y del fototransistor para ver el comportamiento de la señal en espacio libre, es necesario regenerar los impulsos a la salida del fototransistor, para lo cual se emplea un comparador implementado con un amplificador operacional cuya configuración se muestra en la Figura 3.28.

Una vez montado el LED y el fototransistor se probó el enlace a diferentes distancias, el circuito utilizado se muestra en la Figura 3.29.

Para utilizar de manera más eficiente la potencia de salida del LED se

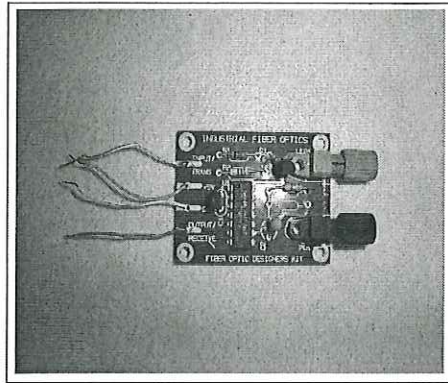


Figura 3.26: Circuito Transmisor-Receptor para sistemas digitales con fibra óptica de plástico.

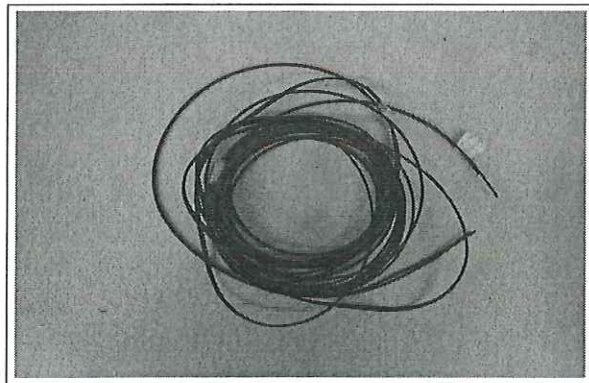


Figura 3.27: Fibra óptica de plástico.

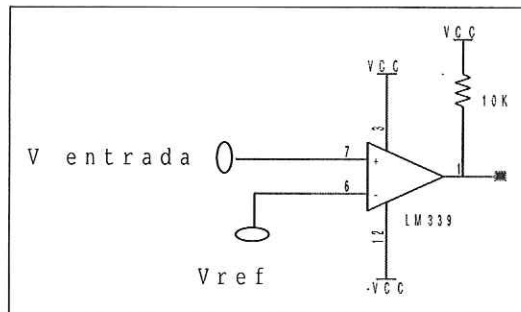


Figura 3.28: Circuito comparador de voltaje a la salida del fototransistor.

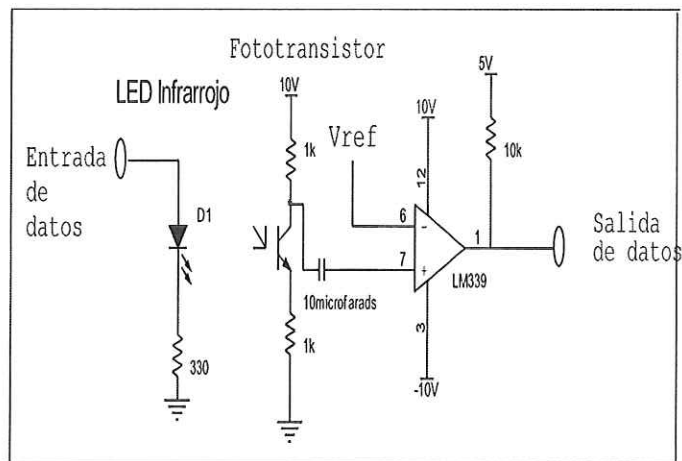


Figura 3.29: Circuito Transmisor-Receptor empleado en las pruebas a diferentes distancias.

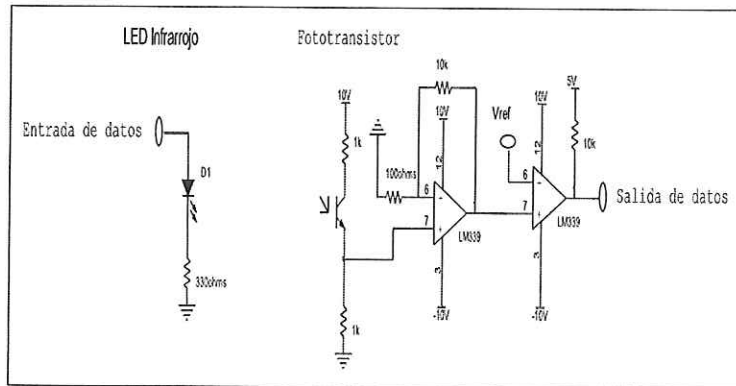


Figura 3.30: Circuito con modificación del voltaje de referencia.

modificó el voltaje de referencia en el receptor a 1 Volt. En la figura 3.30 se muestra el circuito con la modificación mencionada.

En las figuras 3.31 y 3.32 se muestran los diagramas finales de las etapas de transmisión y recepción respectivamente.

3.3.6. Efecto de la luz ambiente en la etapa de recepción

Un problema encontrado en el sistema de comunicación (la señal se degradaba de manera apreciable) fue observado al aumentar la distancia del enlace. Por otro lado, se observó que al cubrir la parte posterior del fototransistor, la señal detectada mejoraba de manera notable. Por lo tanto se decidió adaptar una cubierta en la etapa de recepción para evitar el problema debido a la incidencia de la luz ambiente.

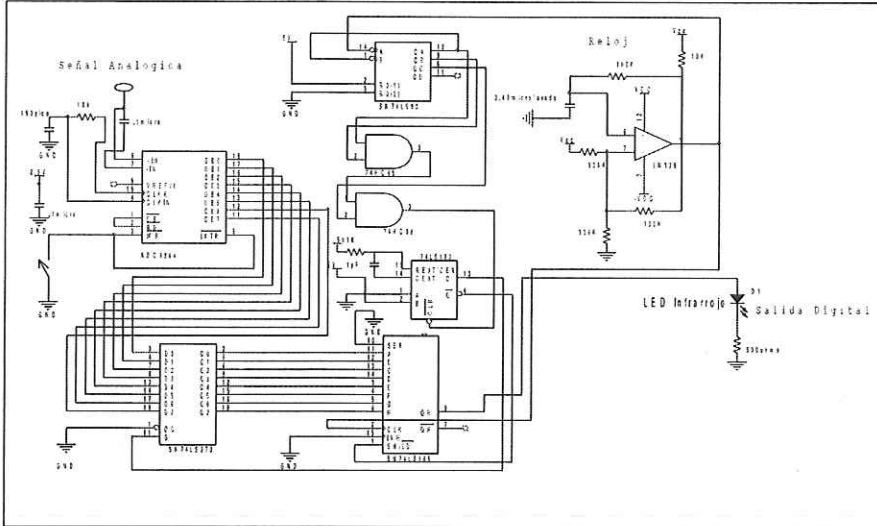


Figura 3.31: Circuito Transmisor completo.

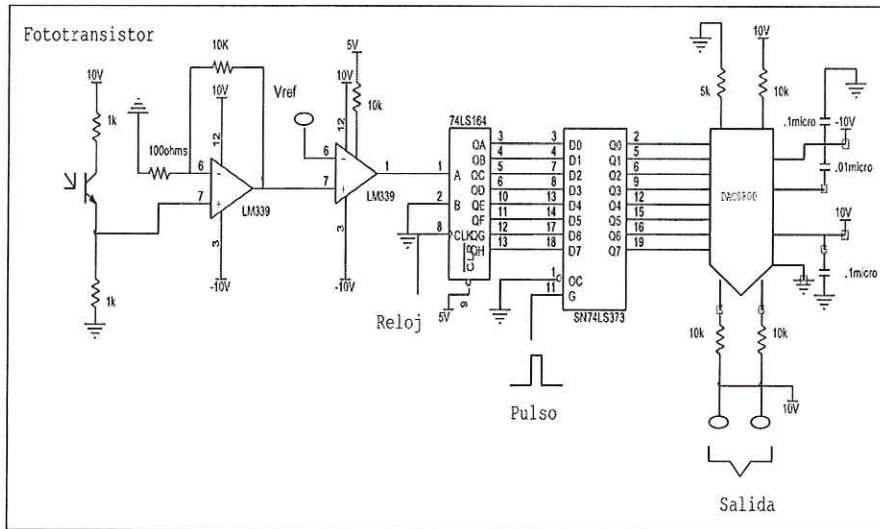


Figura 3.32: Receptor Digital Completo.

Capítulo 4

Pruebas y Resultados

En éste capítulo se presentan las pruebas y resultados obtenidos tanto con el sistema de comunicación analógico como con el sistema de comunicación digital. En primer lugar se muestran los resultados obtenidos con el sistema analógico.

4.1. Resultados obtenidos con el sistema analógico

Puesto que el desempeño del sistema depende fundamentalmente de la distancia de separación del enlace, se procedió a realizar pruebas a diferentes distancias.

4.1.1. Montaje de prueba con separación inferior a 1 cm

El montaje de la prueba a menos de 1cm de separación se muestra en la figura 4.1, mientras que el resultado de la prueba se muestra en la figura 4.2.

Como se puede observar en la figura 4.2, en el canal 1 del osciloscopio (entrada) se tiene una señal sinusoidal de 50 mVpp y en el canal 2 del osciloscopio se tiene una señal con una amplitud cercana a 10 Vpp, ya que la escala de este canal es de 5 V/div que muestra un ligero desfasamiento con respecto a la señal del canal 1. La ganancia del enlace a esta distancia es del orden de 200 veces. Es evidente que la señal de entrada se ve más ruidosa que la señal de salida, esto se debe a que la salida esta filtrada.

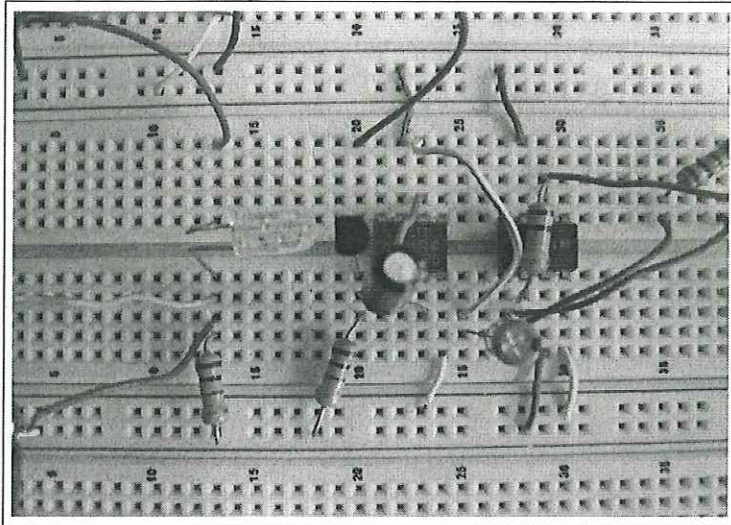


Figura 4.1: Montaje del sistema analógico con separación entre el transmisor y el receptor menor a 1 cm.

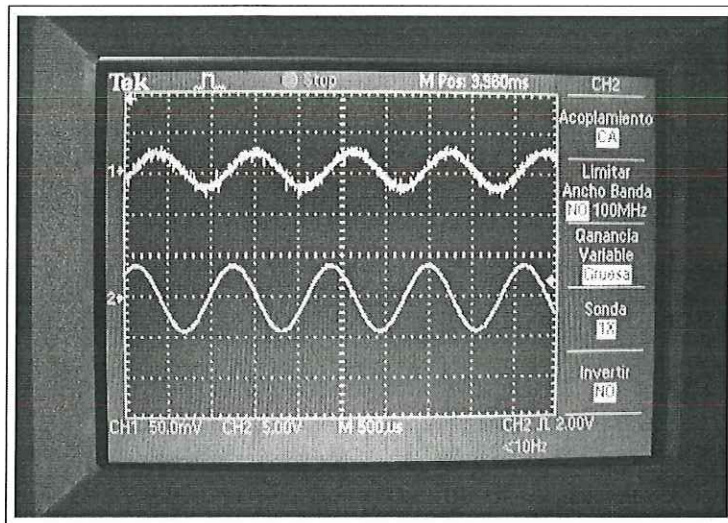


Figura 4.2: Resultado del montaje del sistema analógico con separación entre el transmisor y el receptor menor a 1 cm.

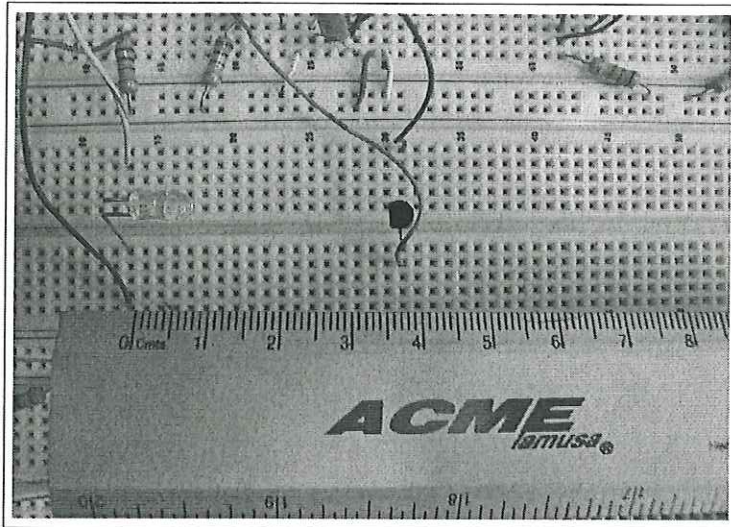


Figura 4.3: Montaje del sistema analógico con separación entre el transmisor y el receptor de 4 cm.

4.1.2. Montaje de prueba con separación de 4 cm

Al aumentar la distancia entre el LED infrarrojo y el fotodiodo sin modificar de manera apreciable el apuntamiento entre ambos componentes (como se puede observar en la figura 4.3) a 4 cm, se puede observar una reducción importante en la ganancia del enlace, de tal forma que se tiene una señal de salida cercana a 1 Vpp (ver figura 4.4), es decir se tiene una ganancia cercana a 20.

4.1.3. Montaje de prueba con separación de 7 cm

En esta prueba se modifico nuevamente la distancia de separación entre el elemento emisor y el elemento detector como se muestra en la figura 4.5. Se puede observar con más claridad en la figura 4.6 la reducción de la ganancia en función a la distancia del enlace, la señal recibida se atenuó hasta llegar a una amplitud cercana a los 200 mVpp.

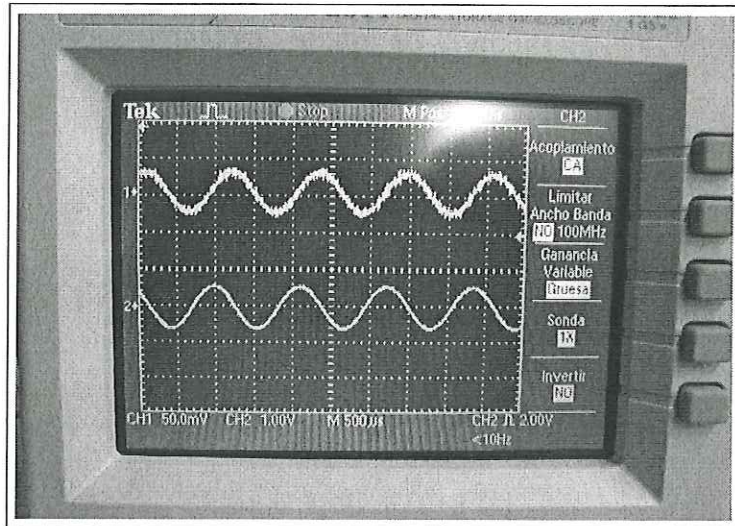


Figura 4.4: Resultado del montaje del sistema analógico con separación entre el transmisor y el receptor de 4 cm.

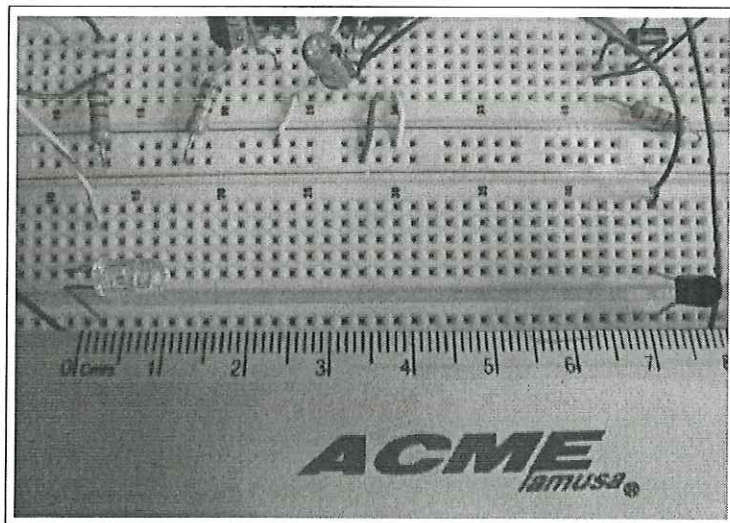


Figura 4.5: Montaje del sistema analógico con separación entre el transmisor y el receptor de 7 cm.

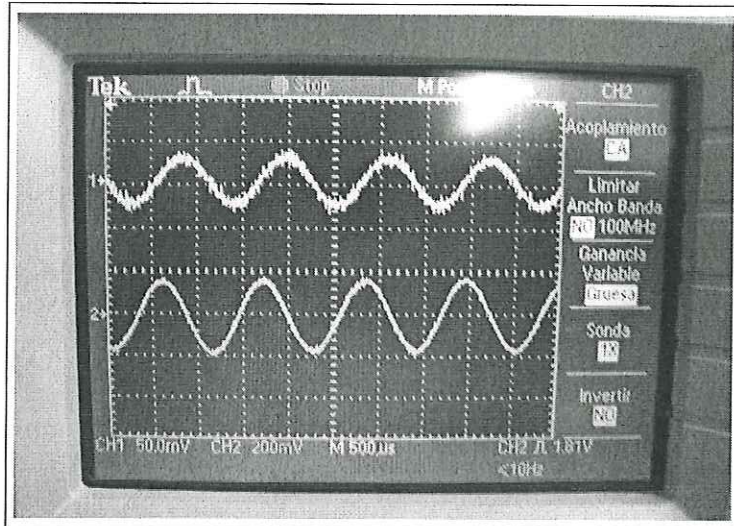


Figura 4.6: Resultado del montaje analógico del sistema con separación entre el transmisor y el receptor de 7 cm.

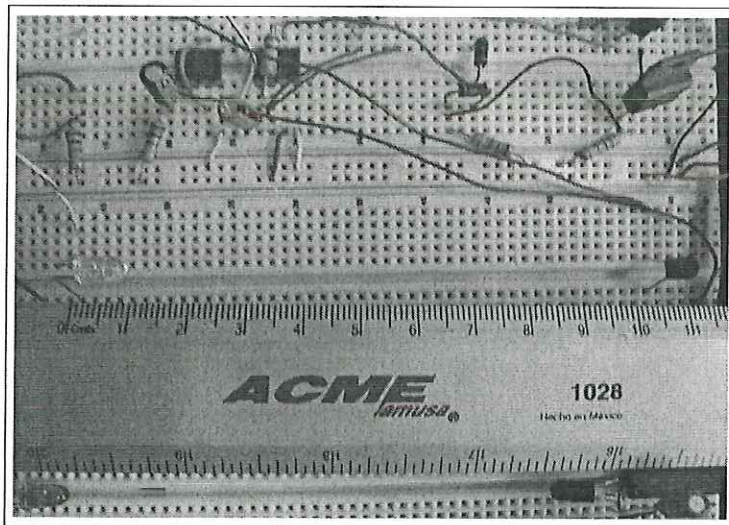


Figura 4.7: Montaje del sistema analógico con separación entre el transmisor y el receptor de 10 cm.

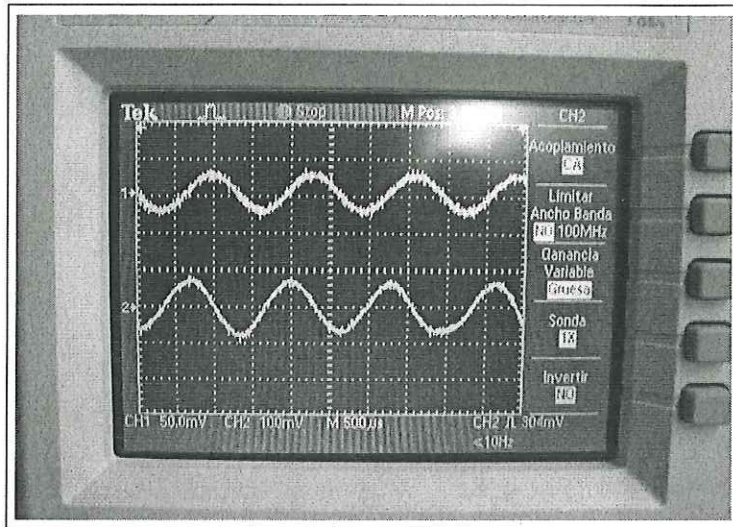


Figura 4.8: Resultado del montaje del sistema analógico con separación entre el transmisor y el receptor de 10 cm.

4.1.4. Montaje de prueba con separación de 10 cm

La última prueba realizada al sistema analógico se efectuó con una separación entre emisor y detector de 10 cm, tal como se muestra en la figura 4.7. En esta prueba la pérdida de nivel de la señal de salida es evidente al observar en la figura 4.8 que el nivel de la señal de salida es ligeramente superior a 100 mVpp. Es importante mencionar que el nivel de la señal de entrada se mantuvo constante durante todas las pruebas.

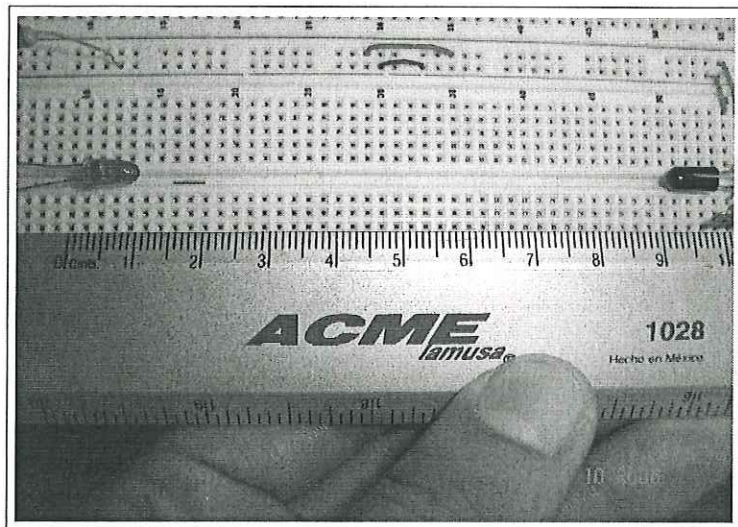


Figura 4.9: Montaje del sistema digital con separación entre el transmisor y el receptor de 10 cm.

4.2. Resultados obtenidos con el sistema digital

En esta sección se muestran los montajes y resultados obtenidos durante las pruebas del sistema de comunicación digital, es decir en este sistema la señal de información que se envía entre el emisor y el detector es de tipo discreto (unos y ceros).

4.2.1. Montaje de prueba con separación de 10 cm

En la figura 4.9 se muestra el montaje del sistema de transmisión-recepción digital con una separación entre emisor y detector de 10 cm. Por otro lado, en la figura 4.10 se muestra el resultado de la señal detectada a la distancia mencionada. Como se puede observar (en la figura 4.10) el canal uno corresponde a la señal sinusoidal de entrada digitalizada, mientras que el canal dos corresponde a la señal recibida y convertida a su forma original. Nótese que la señal reconstruida tiene una amplitud cercana a 5 Vpp.

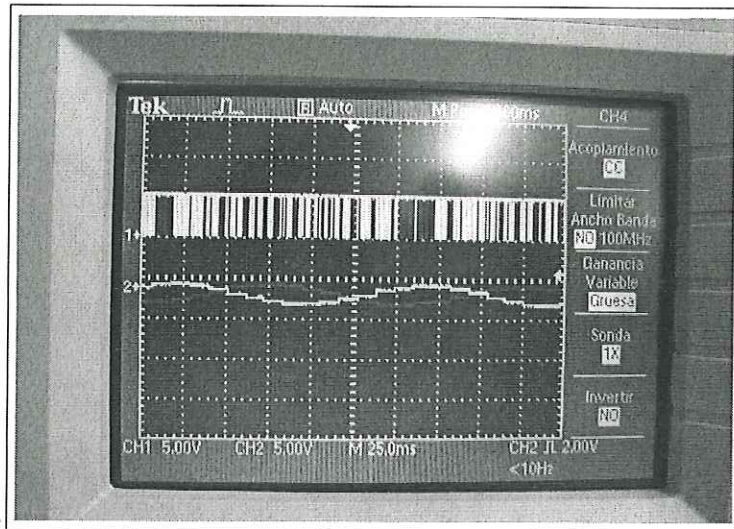


Figura 4.10: Resultado del montaje del sistema digital con separación entre el transmisor y el receptor de 10 cm.

4.2.2. Montaje de prueba con separación de 25 cm

Al modificar la distancia del enlace a 25 cm, tal como se muestra en la figura 4.11 se obtuvieron las formas de onda mostradas en la figura 4.12, en ésta figura se observa una tercera señal, la cual corresponde a la señal de entrada del receptor. En éste caso, aún cuando la distancia de enlace es mayor, se verifica que la señal después de pasar por un regenerador de nivel es prácticamente igual a la del enlace a 10 cm.

4.2.3. Montaje de prueba con separación de 50 cm

En esta prueba la distancia de separación del enlace (ver figura 4.13) es mucho mayor a la distancia máxima que permitía la recuperación de señal en el sistema analógico y sin embargo la detección de la señal digital sigue siendo adecuada, tal como puede observarse en la figura 4.14.

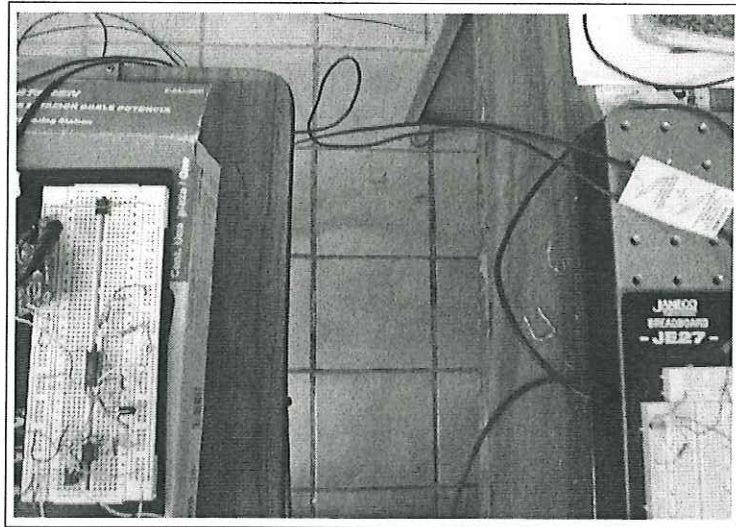


Figura 4.11: Montaje del sistema digital con separación entre el transmisor y el receptor de 25 cm.

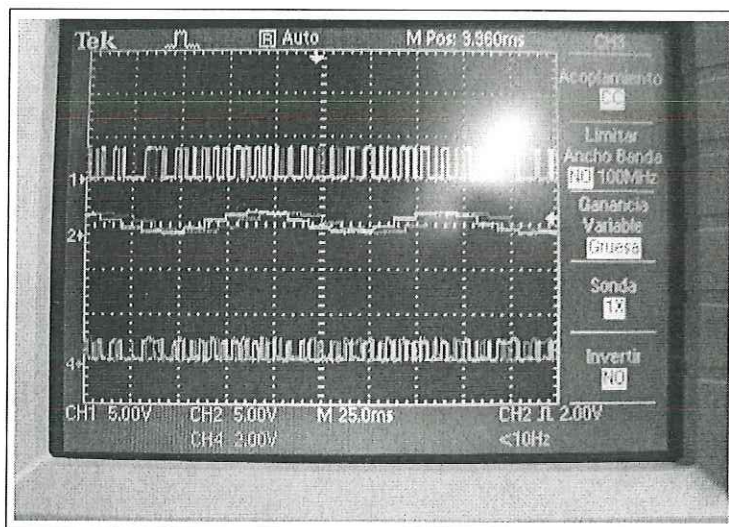


Figura 4.12: Resultado del montaje del sistema digital con separación entre el transmisor y el receptor de 25 cm.

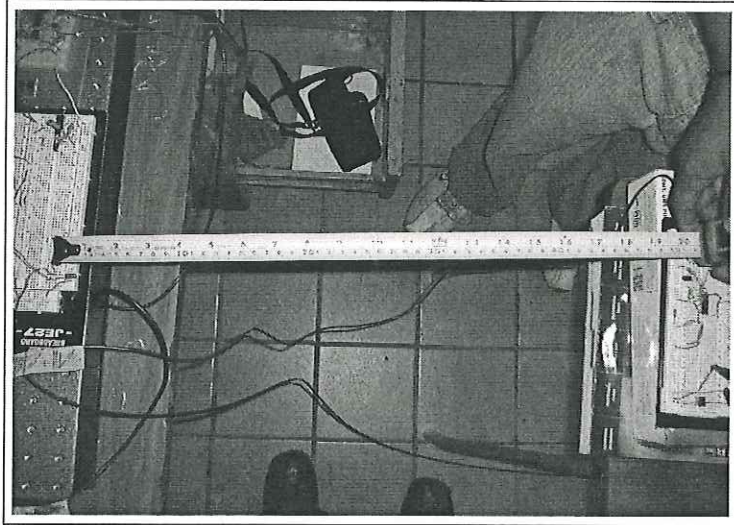


Figura 4.13: Montaje del sistema digital con separación entre el transmisor y el receptor de 50 cm.

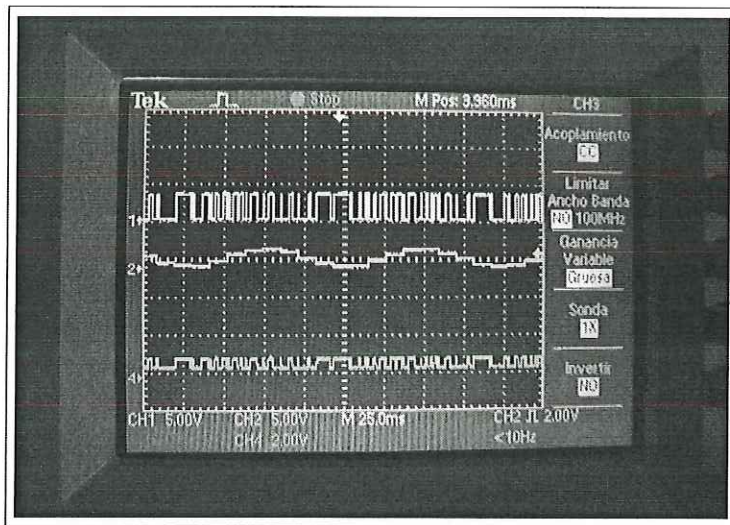


Figura 4.14: Resultado del montaje del sistema digital con separación entre el transmisor y el receptor de 50 cm.

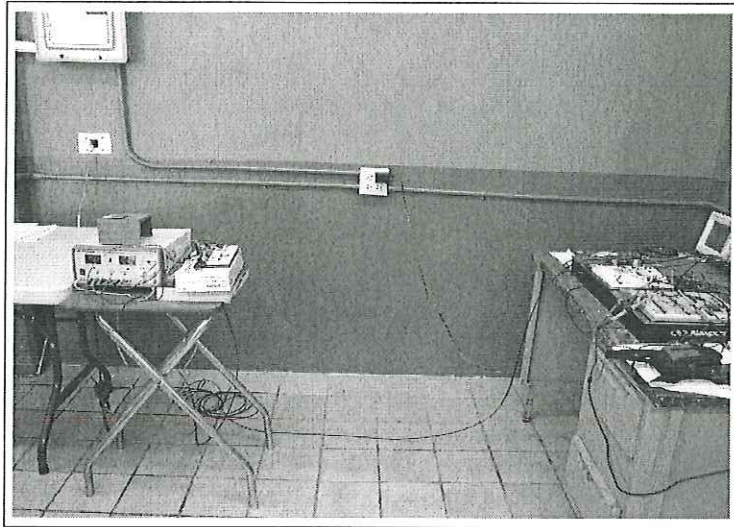


Figura 4.15: Montaje del sistema digital con separación entre el transmisor y el receptor de 110 cm.

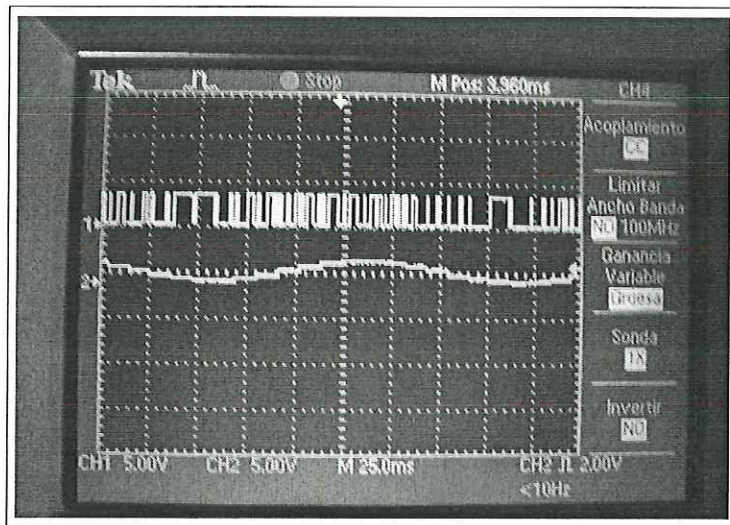


Figura 4.16: Resultado del montaje del sistema digital con separación entre el transmisor y el receptor de 110 cm.

4.2.4. Montaje de prueba con separación de 110 cm

En esta última prueba ya no aparece la señal de entrada del receptor, debido a que la longitud limitada de las puntas del osciloscopio no permite hacer la conexión en los circuitos que tienen una separación entre emisor y detector de 110 cm (ver figura 4.15). sin embargo, como puede observarse en la figura 4.16 se sigue manteniendo el nivel de la señal reconstruida y del mismo modo se mantiene constante la relación señal a ruido para las distancias de enlace a que se sometió el sistema.

Capítulo 5

Conclusiones

En este trabajo de tesis se presenta el diseño y construcción de dos sistemas optoelectrónicos de transmisión-recepción: uno analógico y el otro digital. La utilización de estos dos sistemas de comunicación para fines didácticos permitirá visualizar de manera sencilla las grandes diferencias que existen desde el diseño hasta la caracterización pasando por la construcción de tales sistemas.

Durante la construcción y pruebas del sistema analógico fue necesario hacer varios cambios de diseño y componentes, de manera que se obtuviera un sistema adecuado. A cada cambio en el sistema se evaluaban las posibles deficiencias y mejoras en el desempeño del circuito, los cambios implementados se describen con detalle en esta tesis. En cuanto al sistema digital, los cambios se hicieron principalmente para sustituir instrumentos por subcircuitos que realizaran las funciones de manera autónoma, por lo cual fue más sencillo describir los cambios.

Respecto a las pruebas, se observó una gran diferencia en desempeño entre los dos sistemas de transmisión-recepción con respecto a la distancia de enlace utilizada. Para el caso del sistema analógico se observó una caída dramática del nivel de la señal recibida por lo que el enlace se tuvo que limitar a una distancia máxima de 10 cm, aún cuando el sistema de recepción incluía dos etapas de amplificación. Por otro lado, en el sistema digital no se observó a tal nivel la dependencia de la señal de salida (reconstruida) con la distancia, lo anterior no significa que no exista atenuación para los sistemas de enlaces digitales, lo que en realidad se observa es que la detección de señales digitales (*on-off*) es más sencilla y mientras se pueda decidir de manera clara si se recibió un uno o un cero, la señal detectada se puede reconstruir por medio

de un circuito comparador, con el cual se obtendrá una señal digital con el nivel adecuado de la familia lógica empleada y por tanto será fácil realizar la reconstrucción de la señal analógica representada por los impulsos.

Las diferencias entre éstos dos sistemas son visibles tanto en las etapas de transmisión como en las etapas de recepción. Para el caso de los sistemas evaluados en este trabajo se observó una clara ventaja del sistema digital, sin embargo la complejidad del circuito y la dependencia de impulsos de sincronización pueden reducir el entusiasmo en la aplicación de estos sistemas, sobre todo al comparar la simpleza en el diseño de los sistemas analógicos.

Otro punto importante en la utilización de los sistemas optoelectrónicos es la alineación entre el emisor y el detector. Este punto es particularmente importante para sistemas que utilizan diodos láser como dispositivos emisores, ya que su directividad aunque permite alcanzar distancias de enlace enormes, requiere un alineamiento muy cuidadoso pues un apuntamiento deficiente entre los dispositivos emisor y detector puede provocar la pérdida completa de la información.

En cuanto a costos el sistema digital se encuentra en desventaja, ya que el sistema debe incluir circuitos convertidores, tanto analógico-digitales como digitales-analógicos, circuitos de sincronización, recuperadores de reloj, reforzadores, etc.

Finalmente cabe mencionar que la implementación de este tipo de circuitos en forma de módulos intercambiables y reconfigurables sería de gran utilidad como herramientas didácticas para los estudiantes de ingeniería electrónica. Para poder utilizar los sistemas propuestos en transmisiones de audio simplemente se requiere cambiar los circuitos convertidores por dispositivos que cubran el ancho de banda requerido por la voz. Los sistemas propuestos corresponden a configuraciones básicas que pueden mejorarse principalmente con la utilización de componentes de mayor capacidad, aunque por supuesto eso repercutiría directamente en el costo de fabricación.

Bibliografía

- [1] Muraoka Espíritu R. y Villanvazo O. "Foto- receptores para apuntamiento láser con aplicación en comunicaciones ópticas en espacio libre" Tesis de Licenciatura, UABC (1998).
- [2] KEISER G. "Optical Fiber Communications" McGraw-Hill International Student Edition.
- [3] Frenzel Louis E. "Electrónica aplicada a los sistemas de comunicaciones" Alfa omega Editores, 3a. Edición, 2003.
- [4] Tomasi W. "Sistemas de comunicación electrónicas" Prentice Hall, 4a. Edición, 2003.
- [5] Boylestad R.C. and Nashelsky L. "Electrónica: Teoría de Circuitos" Prentice Hall, 6ta. Edición, 1997.
- [6] Schwartz Mischa "INFORMATION TRANSMISSION, MODULATION, AND NOISE" McGraw-Hill, 3rd. Edition, 1980.
- [7] Taub, B. and Schilling, D. "Principles of Communication Systems" McGraw-Hill, 2nd. Edition, 1987.
- [8] Wordsworth Reference "Dictionary of Science & Technology" , Wordsworth Editions Ltd.1995.
- [9] Jerald G. Graeme, Gene E. Tobey and Lawrence P. Huelsman. "Operational Amplifiers " McGraw - Hill 17a. Edición. 1985.
- [10] <http://www.national.com/ds/DC/ADC0801.pdf>
- [11] http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/S/N/7/4/SN74LS165-D.shtml

[12] <http://onsemi.com>

[13] http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/S/N/7/4/SN74LS164-D.shtml

Apéndice A

Cálculos de enlace

A.1. Cálculos de longitud de enlace

En este anexo se muestran los cálculos que se desarrollaron para estimar la distancia máxima de los sistemas de comunicación analógico y digital de este trabajo de tesis a la cual puede recuperarse correctamente la información.

En las figuras A.1 y A.2 se representa el comportamiento ideal de los dispositivos emisor y detector. Conociendo estos valores se procede a utilizar los niveles de potencia en decibeles para calcular la atenuación de enlace en función de la distancia del sistema. En base a la atenuación calculada se puede predecir la distancia máxima del enlace a la cual puede asegurarse el funcionamiento del sistema.

En primer lugar el dispositivo emisor de luz (LED) genera una potencia óptica proporcional a la corriente que se le inyecta, en la hoja de especificaciones del fabricante se puede verificar la respuesta del LED ver figura A.5. En cuanto al componente receptor, se tiene un dispositivo que genera una corriente (fotocorriente) proporcional a la potencia óptica que recibe. De las hojas de los datos se toma el valor de corriente de oscuridad, la cual sirve para calcular el voltaje de referencia. El voltaje de referencia siempre deberá ser mayor al valor de voltaje obtenido por la corriente de oscuridad al circular a través de R.

$$V_{ref} > V_{obs} = IR$$

En la figura A.3 se muestra de manera gráfica los niveles de voltaje que se requieren para operar correctamente el sistema.

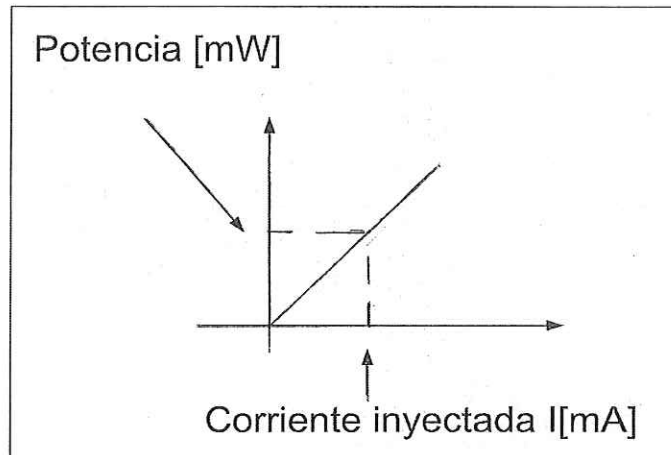


Figura A.1: Gráfica ideal de la relación $P_{opt} - I_{in}$ del LED.

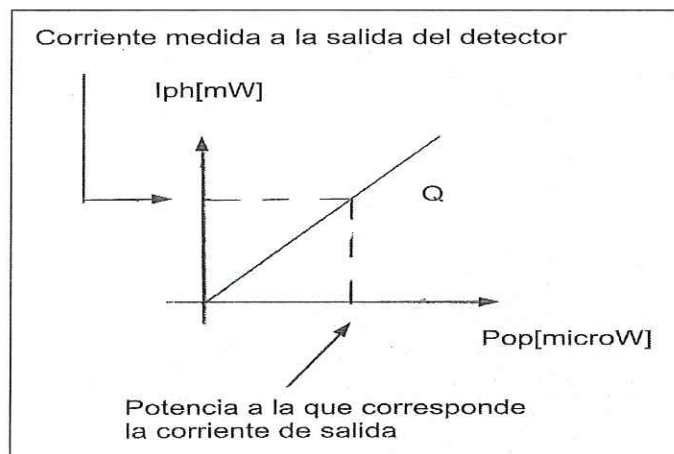


Figura A.2: Gráfica ideal de la relación $I_{ph} - P_{opt}$ del fotodetector.

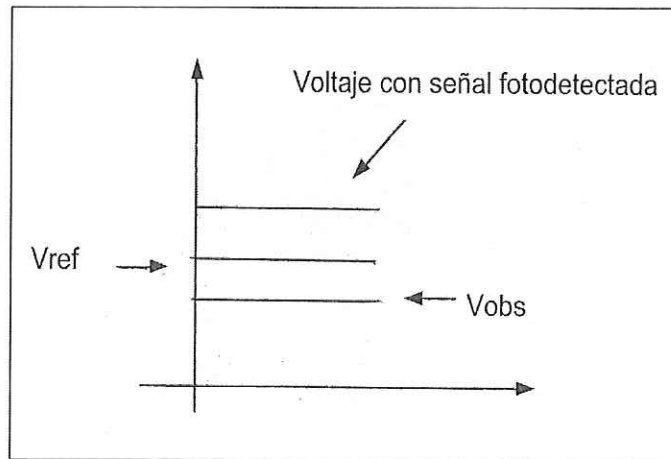


Figura A.3: Voltaje de referencia.

A.1.1. Emisor (LED)

Para calcular la distancia del enlace es necesario conocer en primer lugar la corriente que se le inyecta al dispositivo es decir:

$$I_D = \frac{(V_{CC} - V_F)}{R_D} \quad (A.1)$$

Sustituyendo valores:

$$I_D = \frac{(5 - 1.7)V}{330 \Omega} = 10 \text{ mA} \quad (A.2)$$

Por lo tanto

$$I_D = 10 \text{ mA.}$$

En la figura A.4 se muestra el diagrama de conexión del dispositivo emisor.

La curva de respuesta del (LED) proporcionada por el fabricante se muestra en la figura A.5. de tal figura se obtiene la potencia del dispositivo emisor correspondiente a la corriente inyectada cuyo valor es de 4 mW.

A.1.2. Fototransistor

Para el dispositivo empleado se tiene una corriente de oscuridad de 100 nA cuando el dispositivo no esta iluminado y por lo tanto se genera

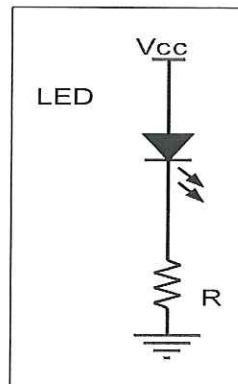


Figura A.4: Diagrama de conexión del LED.

un voltaje de oscuridad dado por:

$$V_E = (100 \text{ nA})(1 \text{ k}\Omega) = 100 \mu\text{V} = 0.1 \text{ mV}$$

Entonces el nivel de voltaje de referencia requerido para el comparador pueda decidir si se recibe un "1" ó un "0" es

$$V_{ref} = (V_E)(G)V_{ref} = (.1 \text{ mV})(100) = 10 \text{ mV}$$

La corriente máxima que puede circular por el fototransistor corresponde a su operación en la región de saturación y se calcula por medio de la ecuación 6.3

$$I_{cmax} = \frac{V_{cc}}{R_C + R_E} \quad (\text{A.3})$$

Por lo tanto

$$I_{cmax} = \frac{10\text{V}}{2\text{k}\Omega} = 5\text{mA} \quad (\text{A.4})$$

En la figura A.7 se muestra la recta de carga del fototransistor y se indica la región en donde opera el transistor cuando no recibe señal óptica.

En la figura A.8 se muestra la respuesta del fototransistor dada por el fabricante en la hoja de especificaciones y en la figura A.9 las curvas de salida en función de la potencia óptica recibida por el fototransistor.

La señal detectada es amplificada por medio de un amplificador operacional cuya ganancia es $G_V = 100$, por lo tanto la señal que se inyecta al

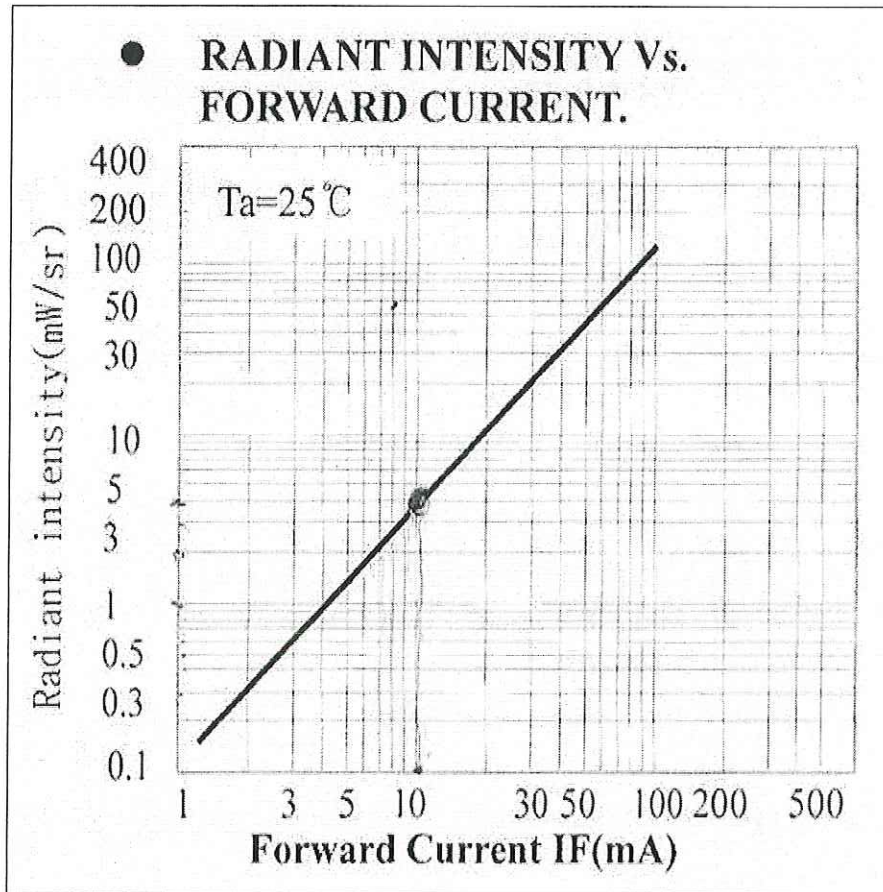


Figura A.5: Gráfica de respuesta *Intensidad radiada vs Corriente* del LED proporcionada por el fabricante.

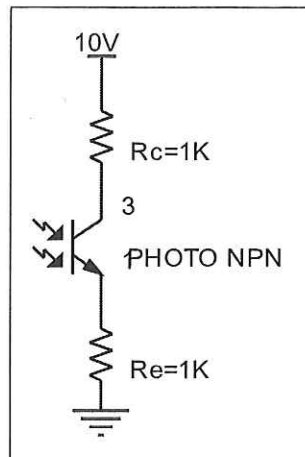


Figura A.6: Diagrama de conexión del Fototransistor.

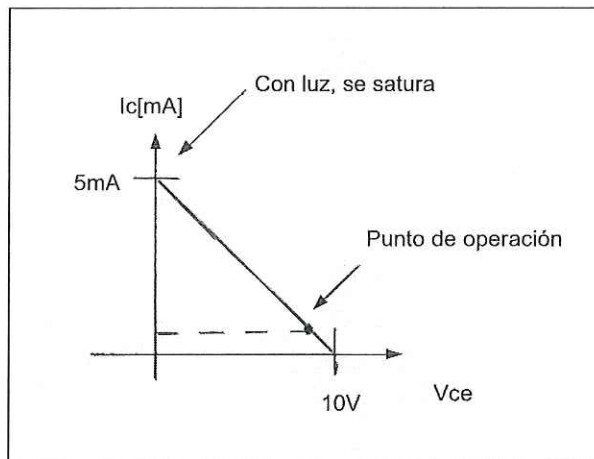


Figura A.7: Recta de carga del fototransistor en donde se muestra la región de saturación (la intensidad de iluminación sobre el fotodiodo es elevada) y el punto de operación Q (sin iluminar el dispositivo).

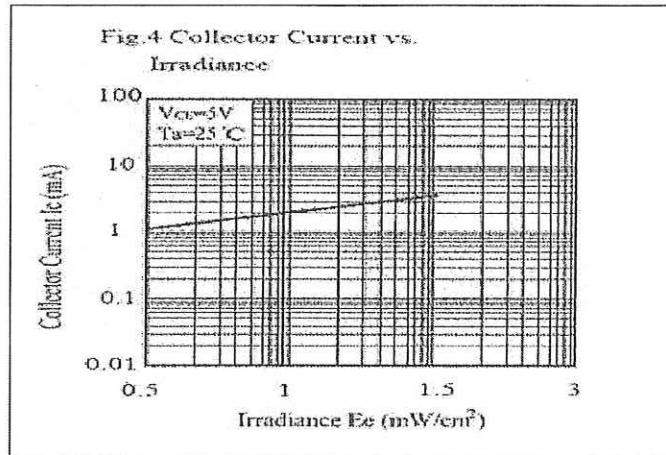


Figura A.8: Curva de respuesta *Potencia óptica vs Corriente fotogenerada* del fototransistor proporcionada por el fabricante.

comparador es decir, el valor de la señal que se obtiene sin iluminación del fotodetector corresponde al nivel de voltaje de referencia empleado.

Considerando los valores siguientes:

$$G_V = 100$$

$$V_0 = 200 \text{ mV}$$

y sabiendo que

$$G = \frac{V_0}{V_i} \tag{A.5}$$

Se sustituyen los valores y se despeja el termino V_i de la ecuación A.5, con lo que se obtiene:

$$V_i = \frac{200 \text{ mV}}{100} \tag{A.6}$$

entonces:

$$V_i = 2 \text{ mV}$$

Por lo tanto

$$I_E = 1 \mu A$$

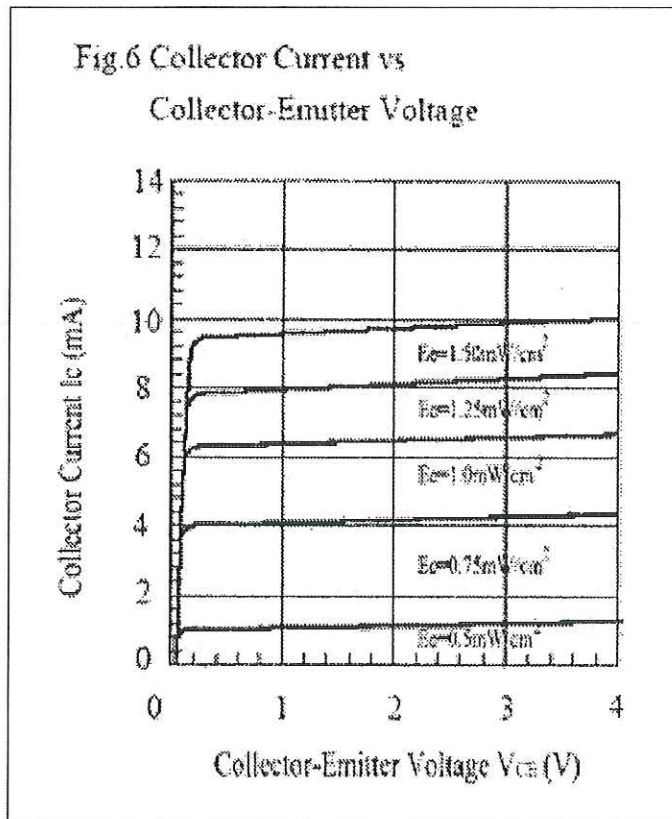


Figura A.9: Curvas de salida del fototransistor a diferentes intensidades de iluminación proporcionada por el fabricante.

Distancia	V_{ent} (Tx)	V_{sal} (Rx)
1 cm	100 mV _{pp}	10 V _{pp}
4 cm	100 mV _{pp}	2 V _{pp}
7 cm	100 mV _{pp}	400 mV _{pp}
10 cm	100 mV _{pp}	200 mV _{pp}

Tabla A.1: Mediciones de señal eléctrica en el emisor y detector del sistema analógico en función de la distancia.

A.2. Cálculo de pérdidas en el sistema analógico.

A continuación se describe el cálculo de la atenuación del sistema analógico. Para calcular la atenuación de la señal óptica en el espacio libre se realizó una caracterización de la respuesta del par emisor-detector en función de la distancia. La caracterización se llevó a cabo midiendo los niveles de las señales eléctricas de entrada y salida a diferentes distancias (ver tabla A.1).

Utilizando las ecuaciones A.7 y A.8 se hace el cálculo de las pérdidas en dB.

$$P_{dB} = 10 \log \frac{P_{receptor}}{P_{emisor}} \quad (A.7)$$

$$\alpha = 10 \log \frac{\left(\frac{V^2}{R}\right)}{\left(\frac{V^2}{R}\right)} = 20 \log \frac{V_{receptor}}{V_{emisor}} \quad (A.8)$$

Sustituyendo valores

$$\alpha = 20 \log \frac{1}{5} = (20)(-0.6989) = -14 \text{ dB/3 cm} \quad (A.9)$$

$$P_{dB} = 10 \log \frac{1}{5} = (10)(-1.3979) = -14 \text{ dB/3 cm} \quad (A.10)$$

Por lo tanto, la atenuación de la señal en espacio libre es:

$$\alpha = -4.6 \text{ dB/cm}$$

Calculando la distancia:

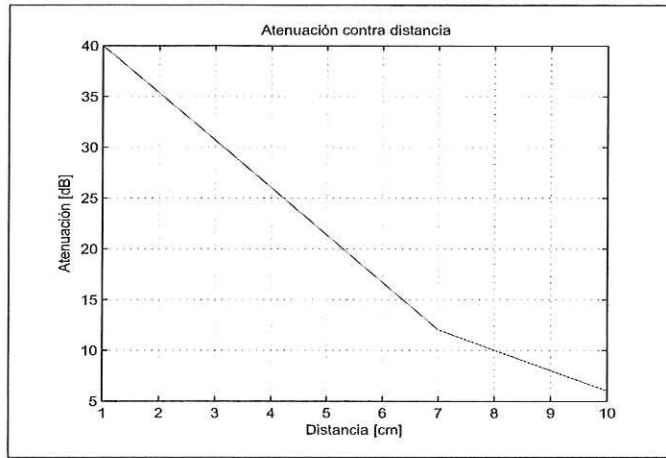


Figura A.10: Gráfica de atenuación vs Distancia realizada en programa Matlab.

Distancia [cm]	V_{RE} [mV _{pp}]	A_v [dB]	A_v/d [dB/cm]
10	176	-15	0
25	21.6	-33	18.3/15
50	5	-45	11.7/25
110	1.3	-57	12/60

Tabla A.2: Mediciones de señal eléctrica detectada en el sistema digital con respecto a la distancia.

$$L = \frac{-30 \text{ dB}}{-4.6 \text{ dB}} = 7 \text{ cm}$$

Observando en las gráficas A.10 y A.11 la respuesta a la distancia de 7cm, se nota un cambio en la pendiente que coincide con problemas de lectura de la señal recibida, lo cual indica el límite de distancia de operación.

A.3. Calculo de pérdidas en el sistema digital

Partiendo de los datos medidos con el fotodiodo en donde la respuesta es aproximadamente lineal y observando la tabla A.2 sabemos que la atenuación

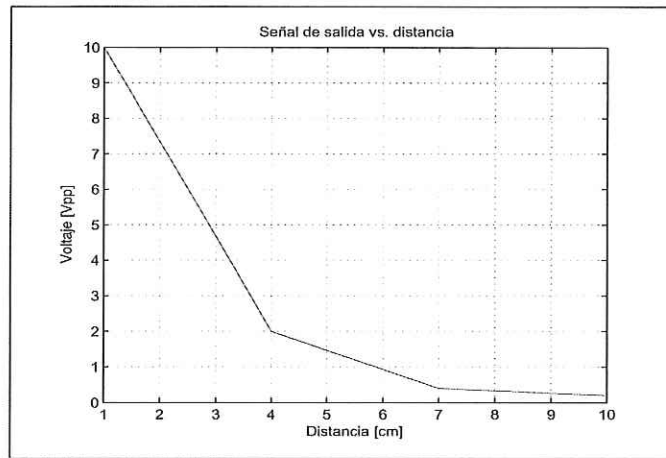


Figura A.11: Gráfica de señales de entrada y salida vs Distancia realizada en programa Matlab.

de la señal óptica en el aire es aproximadamente igual a:

$$\alpha = -4.6 \text{ dB/cm}$$

La atenuación que sufre la señal óptica que se detecta en el fototransistor se muestra en tabla A.2

Las gráficas que se muestran en las figuras A.12 y A.13 indican el comportamiento de la señal en espacio libre.

Se observa que las pendientes de atenuación para el caso digital son diferentes con respecto a las pendientes del caso analógico, lo cual es explicable, debido a que el fototransistor tiene un respuesta (no lineal) diferente a la del fotodiodo.

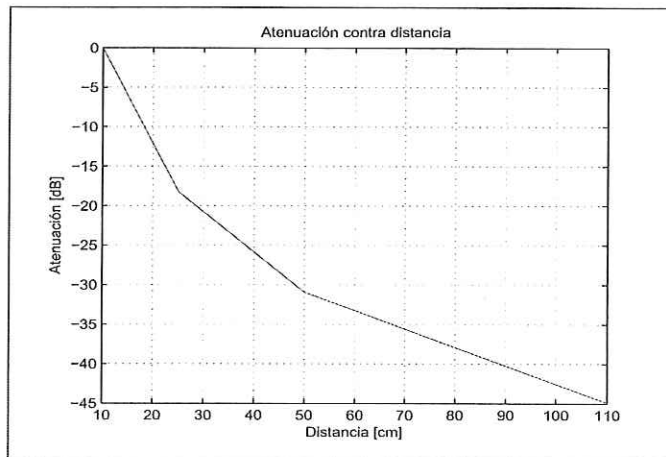


Figura A.12: Gráfica de atenuación (α [dB]) vs distancia realizada con el programa matlab.

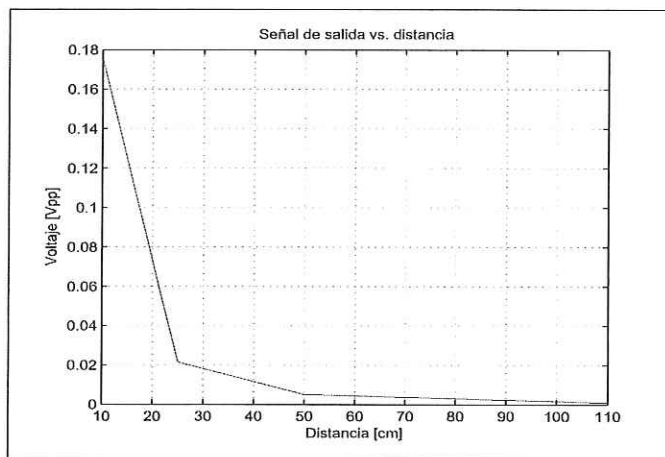


Figura A.13: Gráfica de voltaje de salida (V_{sal}) vs distancia realizada con el programa matlab.