



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

***TRANSMISION MULTIPLE DE SEÑALES DIGITALES
POR FIBRA OPTICA***

TESIS QUE

Para obtener el título de
INGENIERO EN ELECTRONICA

PRESENTA:

ABEL BECERRA RODRIGUEZ.

ASESOR:

Dr. GILBERTO GONZALEZ AVALOS



RESUMEN

La fibra óptica como medio de transmisión de datos se utiliza ampliamente en las telecomunicaciones, actualmente es el medio de transmisión por excelencia ya que permite enviar una gran cantidad de datos a grandes distancias evitando interferencias electromagnéticas propias de los conductores convencionales, sin embargo el uso de esta tecnología tiene sus desventajas, tanto en reparación de daños al cable, como el uso de equipos especiales.

En la presente tesis de licenciatura se utiliza el sistema clásico de transmisión de datos basado en la Modulación de amplitud AM, en este caso para señales digitales dando como resultado el uso de la modulación digital ASK, el objetivo principal es transmitir múltiples señales digitales o al menos dos señales por un único medio de transmisión, como lo es la fibra óptica.

Dentro de los primeros capítulos se presenta una idea general del objetivo del proyecto, así como la teoría necesaria para desarrollar los circuitos que se implementarán para lograr transmitir las señales exitosamente. Posteriormente se presentan los resultados obtenidos tanto para la etapa de transmisión así como para la etapa de recepción de señales. Finalmente se presentan los diseños propuestos de igual forma para ambas etapas.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a mi asesor de tesis, el Dr. Gilberto Gonzales Avalos, que sin su ayuda, su apoyo y su conocimiento durante todo este tiempo la culminación de la presente tesis no hubiera sido posible. Mi agradecimiento a mi madre Ma. Salud Becerra Rodríguez, que sin su apoyo y su cariño nunca hubiera podido terminar mi carrera, gracias por todo. Agradezco profundamente a la Facultad de Ingeniería Eléctrica (FIE) y a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), por todo el tiempo que me brindo hacer uso de sus instalaciones que todos debemos aprender a valorar más.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
ÍNDICE GENERAL.....	iv
LISTADO DE FIGURAS.....	vii
LISTADO DE ABREVIATURAS.....	x

Capítulo 1: Introducción

1.1 La fibra óptica como canal de transmisión.....	1
1.2 Objetivo.....	2
1.3 Justificación.....	2
1.4 Metodología.....	3
1.5 Contenido de la tesis.....	4

Capítulo 2: Antecedentes de la transmisión de señales por fibra óptica

2.1 Introducción.....	5
2.2 Fibra óptica.....	6
2.2.1 Definición.....	6
2.2.2 Características.....	6
2.2.3 Componentes de la fibra óptica.....	7
2.2.4 Tipos de fibras ópticas.....	8
2.2.5 Fibras mono modo.....	8
2.2.6 Fibras multimodo.....	9
2.2.7 Fibras multimodo de índice graduado.....	10
2.2.8 Modo de propagación dentro de una fibra óptica.....	11
2.2.9 Angulo crítico.....	14
2.2.10 Reflexión total interna.....	15
2.2.11 Perfil de índice.....	16
2.2.12 Angulo y cono de aceptación.....	17
2.2.13 Apertura numérica.....	18

2.2.14	Perdidas en la fibra óptica.....	19
2.2.15	Fuentes de luz.....	27
2.2.16	Características que deben cumplir los LED.....	28

Capítulo 3: Diseño del sistema de transmisión

3.1	Introducción.....	32
3.2	Modulación de amplitud.....	33
3.2.1	Generación de una señal de AM.....	33
3.2.2	Modulación digital de amplitud ASK.....	34
3.3	Osciladores.....	36
3.3.1	Funcionamiento de un oscilador.....	37
3.3.2	Oscilador puente de wein.....	38
3.4	Diseño del transmisor múltiple.....	39
3.5	Generación de la señal portadora.....	40
3.6	Mensaje a transmitir.....	41
3.7	Modulación de señales.....	43
3.7.1	Multiplicador de precisión AD534.....	44
3.7.2	Circuito de modulación.....	45
3.8	Mezclador de señales.....	46
3.9	Acondicionamiento de la señal.....	48
3.10	Convertidor de voltaje a corriente.....	51
3.11	Transmisor óptico.....	53
3.12	Cable de fibra óptica.....	54
3.13	Sistema completo de transmisión.....	54
3.14	Receptor óptico.....	56
3.15	Diseño del receptor múltiple.....	57
3.16	Filtro pasa-banda angosta.....	58
3.17	Demodulación de una señal.....	62
3.18	Filtrado del mensaje.....	63
3.19	Reconstrucción del mensaje original.....	64
3.20	Sistema completo de recepción.....	65

Capítulo 4: Implementación y simulaciones del sistema

4.1	Introducción.....	67
4.2	Sistema de transmisión múltiple.....	67
4.2.1	Generación de la señal portadora.....	67
4.2.2	Modulación ASK.....	71
4.2.3	Mezclador de señales.....	74
4.2.4	Ajuste de rango.....	77
4.2.5	Acondicionamiento de la señal.....	81
4.3	Sistema de recepción múltiple.....	85
4.3.1	Separación de las señales moduladas.....	85
4.3.2	Proceso de demodulación de las señales.....	89

Capítulo 5: Diseño PCB del sistema de transmisión y recepción múltiple.

5.1	Introducción.....	96
5.2	Diseño PCB del sistema de transmisión múltiple.....	96
5.3	Diseño PCB del sistema de recepción múltiple.....	100

Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones

6.1	Introducción.....	103
6.2	Conclusiones sobre la tesis.....	103
6.3	Recomendaciones sobre el sistema.....	105

Bibliografía.....	107
--------------------------	------------

LISTADO DE FIGURAS

Figura 2.1	Componentes de la fibra óptica.....	7
Figura 2.2	Fibra monomodo.....	9
Figura 2.3	Fibra multimodo.....	9
Figura 2.4	Fibra multimodo de índice graduado.....	10
Figura 2.5	Fenómeno de reflexión.....	11
Figura 2.6	Fenómeno de refracción.....	12
Figura 2.7	Ley de Snell.....	14
Figura 2.8	Refracción de ángulo critico.....	15
Figura 2.9	Reflexión total interna.....	16
Figura 2.10	Perfiles de índice.....	17
Figura 2.11	Propagación del rayo dentro y debajo de un cable de fibra óptica.....	18
Figura 2.12	Cono de aceptación de un cable de fibra óptica.....	19
Figura 2.13	Perdida de dispersión de Rayleigh como una función de longitud de onda.....	21
Figura 2.14	Macro curvatura.....	23
Figura 2.15	Micro curvatura.....	23
Figura 2.16	Propagación de la luz por una fibra de índice escalón multimodo.....	25
Figura 2.17	Mala alineación lateral.....	26
Figura 2.18	Mala alineación de la separación.....	26
Figura 2.19	Mala alineación angular.....	27
Figura 2.20	Superficie imperfecta.....	27
Figura 2.21	LED de emisión superficial.....	29
Figura 2.22	LED de emisión de borde.....	30
Figura 2.23	Patrones de radiación LED e ILD.....	31
Figura 3.1	Sistema de transmisión.....	33
Figura 3.2	Representación de una señal senoidal.....	34
Figura 3.3	Representación de modulación ASK.....	35
Figura 3.4	Circuito tanque.....	37
Figura 3.5	Red adelantada-atrasada: (a) Configuración del circuito; (a) Curva de transferencia entrada-salida.....	38
Figura 3.6	Esquema transmisor múltiple.....	39
Figura 3.7	Puente de Wein.....	40
Figura 3.8	Configuración 555 astable.....	42
Figura 3.9	Relación de tiempos.....	42
Figura 3.10	Esquema básico del bloque de modulación.....	43
Figura 3.11	Configuración del AD534 como multiplicador.....	44
Figura 3.12	Diferentes empaquetados del AD534.....	45
Figura 3.13	Diseño del circuito de modulación.....	45
Figura 3.14	Circuito sumador inversor.....	46
Figura 3.15	Circuito sumador de señales.....	47
Figura 3.16	Circuito ajuste de rango del transmisor.....	48

Figura 3.17	Tabla cálculo del valor de la resistencia R_2	51
Figura 3.18	Convertidor de voltaje a corriente.....	52
Figura 3.19	Transmisor óptico HFBR-1402.....	53
Figura 3.20	Configuración del transmisor HFBR-1402.....	54
Figura 3.21	Sistema completo de transmisión.....	55
Figura 3.22	Detector óptico HFBR-2402.....	56
Figura 3.23	Configuración del detector óptico HFBR-2402.....	57
Figura 3.24	Filtro pasa altas.....	58
Figura 3.25	Respuesta de frecuencia del filtro pasa banda angosta.....	59
Figura 3.26	Diseño del filtro pasa banda angosta.....	60
Figura 3.27	Demodulación detección síncrona.....	62
Figura 3.28	Demodulación de la señal original.....	63
Figura 3.29	Comparativo de señales obtenidas.....	63
Figura 3.30	Filtro pasa bajas.....	64
Figura 3.31	Circuito comparador.....	65
Figura 3.32	Sistema completo de recepción.....	66
Figura 4.1	Resultado en osciloscopio. (a) Portadora 1khz (b) Portadora 10kHz.....	68
Figura 4.2	Oscilador en Proteus; (a) Circuito puente de Wein; (b) Portadora 1Khz; (c) Portadora de 10 KHz.....	69
Figura 4.3	Mensaje a transmitir.....	71
Figura 4.4	Señales moduladas. Arriba señal modulada 1 kHz. Abajo señal modulada 10 kHz.....	72
Figura 4.5	Simulación del bloque de modulación.....	73
Figura 4.6	Simulación señales moduladas. (a) Señal modulada (1 kHz), (b) Señal modulada (10 kHz).....	74
Figura 4.7	Señales mezcladas.	75
Figura 4.8	Simulación circuito mezclador de señales.....	76
Figura 4.9	Resultante del mezclador de señales. (a) Señal modulada (1 kHz), (b) señal modulada (10 kHz), (c) Señal mezclada.....	76
Figura 4.10	Etapas de ajuste de rango. (a) Ajuste pico alto (b) Ajuste pico bajo.....	78
Figura 4.11	Señal mezclada en etapa de ajuste de rango.....	78
Figura 4.12	Diagrama de ajuste de rango.....	79
Figura 4.13	Señal sinusoidal en etapa de ajuste de rango mediante simulación.....	80
Figura 4.14	Señal mezclada en etapa ajuste de rango en simulación.....	81
Figura 4.15	Señal sinusoidal en convertidor de voltaje a corriente (a) Valor obtenido en pico más alto, (b) Valor obtenido en pico más bajo.....	82
Figura 4.16	Señal resultante en convertidor de voltaje – corriente.....	83
Figura 4.17	Diagrama utilizado en la simulación del convertidor de voltaje-corriente...84	
Figura 4.18	Señal obtenida en la simulación del convertidor de voltaje – corriente.....85	
Figura 4.19	Señal obtenida a 1 kHz contra la señal original. Canal A señal recuperada Canal B señal original.....86	
Figura 4.20	Señal obtenida a 10 kHz contra la señal original. Canal A señal recuperada Canal B señal original.....87	
Figura 4.21	Diagrama de Filtro pasa banda angosta.....88	

Figura 4.22	Señales recuperadas mediante simulación (a) Señal modulada a 1 kHz (b) Señal Modulada a 10 kHz.....	88
Figura 4.23	Proceso de demodulación se la señal a 10kHz. Canal A: Señal modulada recuperada, Canal B: Señal demodulada.....	89
Figura 4.24	Diagrama utilizado en la demodulación y reconstrucción.....	90
Figura 4.25	Proceso de demodulación señal a 10 kHz. (a) Señal recuperada. (b) Señal demodulada por detección síncrona.....	91
Figura 4.26	Eliminación de la señal portadora y reconstrucción del mensaje. Canal A señal recuperada. Canal B, mensaje reconstruido.....	92
Figura 4.27	Eliminación de la señal portadora.....	93
Figura 4.28	Reconstrucción del mensaje digital 1.....	93
Figura 4.29	Señal obtenida del proceso de demodulación de la señal a 1 kHz.....	94
Figura 4.30	Reconstrucción del mensaje digital 2.....	95
Figura 5.1	Diseño placa transmisor vista superior.....	96
Figura 5.2	Diseño placa transmisor vista inferior.....	97
Figura 5.3	Diseño placa transmisor vista con transparencia.....	98
Figura 5.4	Diseño PCB superior del transmisor.....	99
Figura 5.5	Diseño PCB inferior del transmisor.....	99
Figura 5.6	Diseño placa receptor superior.....	100
Figura 5.7	Diseño placa receptor inferior.....	101
Figura 5.8	Diseño placa receptor vista con transparencia.....	101
Figura 5.9	Diseño PCB superior del receptor.....	102
Figura 5.10	Diseño PCB inferior del receptor.....	102
Figura 6.1	Demodulador ASK detector de envolvente.....	106

LISTADO DE ABREVIATURAS

Hz	-	Hercio
KHz	-	Kilohercio
MHz	-	Índice de refracción
GHz	-	Gigahercio
mA	-	Mili ampere
A	-	Ampere
n	-	Índice de refracción
c	-	Velocidad de la luz en el vacío (300, 000,000 m/s)
v	-	Velocidad de la luz en el medio material
μM	-	Micrómetros
nM	-	Nanómetros
dB	-	Decibel
LED	-	Diodo emisor de luz
ILD	-	Diodo de inyección laser
AM	-	Modulación en amplitud
FM	-	Modulación en frecuencia
ASK	-	Modulación por desplazamiento de amplitud (Amplitude Shift Keying)
FSK	-	Modulación por desplazamiento de frecuencia (Phase Shift Keying)
CD	-	Corriente directa
CA	-	Corriente alterna
LC	-	Circuito oscilante capacitivo – inductivo
RC	-	Circuito oscilante resistivo – capacitivo
555	-	Circuito integrado Timer
AD534	-	Multiplicador de precisión
HFBR-1402	-	Transmisor óptico
HFBR-1402	-	Receptor óptico
Q	-	Factor de calidad
f_c	-	Frecuencia central
BW	-	Ancho de banda

Capítulo 1

INTRODUCCION

1.1 La fibra óptica como canal de transmisión

La transmisión de datos tiene ya una historia bastante extensa, desde la aparición del telégrafo en 1932, hasta nuestros días se ha buscado una manera más eficiente de transmisión de señales a distancia.

Con la aparición de nuevas tecnologías las exigencias de transmisión se han vuelto cada vez más complejas, las necesidades de transmitir grandes cantidades de información aumentaron con la aparición de las computadoras, para satisfacer estos requerimientos de transmisión de datos, los sistemas de transmisión y recepción de la información evolucionaron de manera muy acelerada, pero de nada serviría tener sistemas tan modernos si los medios de transmisión fueran ineficientes, dichos medios de transmisión son los caminos físicos por medio de los cuales viaja la información, comúnmente las señales viajan por medio de ondas electromagnéticas.

Por lo tanto los medios de transmisión se vieron obligados también a evolucionar, en dicha evolución nacieron nuevas formas de transmisión de señales más eficientes, más rápidas y más baratas. Estas nuevas formas cambiaron de manera muy diferente al clásico medio guiado (por cable), para que surgieran medios inalámbricos de transmisión, como lo son las ondas de radio o los sistemas de microondas, sin embargo los medios guiados se siguen utilizando hoy en día, la gran mayoría de las redes están conectadas por algún tipo de cableado como medio de transmisión,

Hoy en día existe una gran cantidad de tipos de cable, los más comunes son; cable coaxial, el cable par trenzado, el cual es el medio más común de transmisión de datos que existe en la actualidad, sin embargo el máximo medio de transmisión guiado, por su amplio ancho de banda, poca atenuación y máxima velocidad de transmisión actualmente

es la fibra óptica, aunque la fibra óptica nació hace ya bastante tiempo y en sus inicios esta no era muy prometedora, ya que las distancias de transmisión de la luz eran demasiado cortas, las cuales incluso no rebasaban algunos cuantos metros de distancia sin embargo, actualmente la fibra óptica es uno de los medios más eficaces de transmisión de señales, posee características muy superiores a los clásicos medios guiados que han existido hasta la fecha, en los capítulos posteriores se expondrán dichas características.

1.2 Objetivo

El objetivo de la presente tesis, consiste en la transmisión de múltiples señales digitales a través de fibra óptica, al menos dos señales digitales diferentes, serán enviadas a través de un sólo canal de transmisión, dichas señales serán enviadas al mismo tiempo, el medio de transmisión como se mencionó anteriormente será fibra óptica, se comprobará que dicha transmisión fue exitosa si las señales en cuestión pueden reconstruirse cada una a su forma original después de que las mismas fueron transmitidas. Para lograr dicho objetivo se diseñará el sistema de transmisión múltiple y recepción múltiple, así como la construcción de los mismos.

1.3 Justificación

La transmisión de múltiples señales digitales permitirá utilizar un único medio de transmisión, lo cual elimina la necesidad de utilizar más de un medio guiado, también se comprobará la eficiencia del medio para transmitir múltiples señales. El presente proyecto de tesis pretende profundizar más en estos temas, en específico de fibras ópticas, ya que los trabajos ya sean de investigación o como temas de algún curso, dentro de la facultad de ingeniería eléctrica son muy limitados, e incluso para muchos estudiantes este tema tan importante es totalmente desconocido.

1.4 Metodología

Para llevar a cabo el desarrollo de la presente tesis, primeramente se presentarán las evidencias del tema en cuestión es decir, las características y propiedades de las diversas formas y tipos de fibras ópticas, de acuerdo a sus distintas propiedades se determinará cual es el tipo de medio de transmisión más adecuado para el desarrollo de esta tesis.

Se utilizará la modulación y demodulación de amplitud para el envío de las señales, además se expondrán en forma teórica los circuitos de transmisión, recepción múltiple, una vez terminados los circuitos en forma teórica se presentaran los cálculos matemáticos que se llegarán a necesitar, además se presentarán las simulaciones necesarias o no, para ayudar o comprobar el funcionamiento de los circuitos en forma teórica, el programa de simulación a utilizar será el *Proteus*, ya que el mencionado programa de simulación cuenta con una extensa variedad de circuitos, en caso de que se llegará a necesitar, una vez terminado lo anterior dichos resultados en caso de ser necesarios serán procesados, para su posterior análisis.

Una vez terminado el análisis teórico de los circuitos, se procederá al armado en *Protoboard* de los circuitos de transmisión y recepción múltiple propuestos lo que comprobará si dicho funcionamiento es correcto, se presentarán los resultados en este documento comprobando si existiere alguna discrepancia entre el circuito de simulación y los resultados reales que resultarán del circuito real, sólo en caso de que las simulaciones se hayan llevado a cabo. Las evidencias del funcionamiento serán agregadas en los capítulos posteriores, estas evidencias pueden ser fotos del funcionamiento o de los resultados arrojados por los aparatos de medición como pueden ser el osciloscopio.

Las señales que serán enviadas también serán reportadas antes y después del envío, estas serán comparadas después de ser enviadas, lo cual permitirá emitir un resultado el cual mostrara que tan eficiente es el sistema para el envío de múltiples señales, a través del medio en cuestión.

Finalmente, a partir de los circuitos propuestos se procederá a realizar el diseño impreso de los mismos, para lograr esto utilizaremos la herramienta de diseño de circuitos electrónicos conocido como *Eagle*, dicho programa es una herramienta muy útil ya que este maneja una gran cantidad de circuitos, además que permite realizar diseños de circuitos de cualquier forma que el usuario requiera.

1.5 Contenido de la tesis

El presente documento de tesis presenta en total 6 capítulos, a continuación una breve descripción de los mismos:

El primer capítulo presenta una pequeña introducción del tema tratado en esta investigación, se hace una breve referencia sobre los medios de transmisión más comúnmente utilizados en la actualidad, así mismo se menciona a grandes rasgos algunas características de la fibra óptica, se presenta también el objetivo de este tema de investigación así como sus posibles ventajas, además se mencionan los diseños que se realizaran para esta tesis, todo lo anterior en forma meramente introductoria.

El segundo capítulo contiene una descripción más profunda sobre los tipos de fibras ópticas así mismo sus características principales, su ancho de banda, modos de transmisión, la atenuación que posee, así como sus propiedades físicas; resistencia mecánica, al calor, al frío etc. Además se mencionan más a detalle los componentes de las fibras ópticas; núcleo, revestimiento etc.

En el tercer capítulo presenta el diseño del sistema de transmisión, este sistema está compuesto de un circuito de transmisión y recepción múltiple, además se presenta el tipo de modulación y demodulación que serán utilizados

El cuarto capítulo trata de la implementación y construcción del sistema de transmisión, así como las pruebas experimentales del sistema.

En el quinto capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones que se proponen o que surgieron a lo largo del desarrollo de esta tesis.

Capítulo 2

ANTECEDENTES EN LA TRANSMISION DE SEÑALES POR FIBRA OPTICA

2.1 Introducción

Las leyes ópticas juegan un papel muy importante en la vida del hombre, la maravillosa facultad de admirar todo aquello que diariamente pasa frente a sus ojos, se lo debe a la luz. Cada vez que observamos lo que ocurre a nuestro alrededor muchas veces nos ponemos a pensar que dichas imágenes del mundo exterior llegan a nuestro conocimiento como información luminosa. De hecho casi el 100% de la información que el hombre recibe, es a través de su canal visual.

El primer intento para utilizar la luz como medio de transmisión fue realizado en el año 1880, por Alexander Graham Bell, experimentó con un aparato que llamo *fotófono*. Utilizó un haz de luz para transmitir información, sin embargo se hizo evidente que la transmisión de las ondas de luz por la atmosfera de la Tierra era impráctica, ya que el vapor de agua, el oxígeno y las partículas existentes en el aire absorben y atenúan las señales en las frecuencias de luz.

Desde entonces se ha buscado una forma de transmitir señales de luz, usando una línea de transmisión que sea altamente confiable y que ésta no reciba perturbaciones desde el exterior, así fue como nació una guía de fibra, llamada Fibra óptica, la cual transmite la información lumínica en cuestión.

Los sistemas de comunicación que cargan información, por un cable de *fibra guiado*, son llamados sistemas ópticos, dichos sistemas utilizan la luz como la portadora de la información, propagar estas ondas de luz por la atmosfera de la Tierra es difícil e impráctico, como se mencionó anteriormente. En consecuencia se utilizan medios guiados

de fibra de vidrio o plástico para contener dichas ondas de luz y guiarlas de una fuente a hacia un destino.

La capacidad para llevar información de un sistema de comunicación es directamente proporcional a su ancho de banda; entre más ancha sea la banda, mayor es su capacidad para llevar información.

2.2 Fibra óptica

2.2.1 Definición

La fibra óptica es hilo muy fino de material muy transparente, vidrio o materiales plásticos, extremadamente puro y no absorbente, el tamaño puede variar entre 10 y 300 micrones este medio de transmisión lleva mensajes en forma de pulsos de luz que representan los datos que se están transmitiendo. El haz de luz que viaja por la fibra óptica queda completamente confinado y se propaga en el interior y a lo largo de la fibra, la cual no es necesariamente en línea recta, para lograr una transmisión exitosa el principio en que se basa la propagación por la fibra es la reflexión total interna.

2.2.2 Características

Básicamente, la fibra óptica se compone de una región cilíndrica la cual se denomina núcleo el cual tiene un alto índice de refracción, éste a su vez está rodeado de una zona externa de un material similar al del núcleo, pero con un índice de refracción menor la cual es necesaria para que se produzca el proceso de propagación.

La capacidad de transmisión de información que tiene una fibra óptica depende de tres características fundamentales:

- a) Diseño geométrico de la fibra.
- b) Propiedades de los materiales empleados en su elaboración.
- c) Anchura espectral de la fuente de luz utilizada.

En el interior de una fibra óptica, la luz se va reflejando contra las paredes en ángulos muy abiertos, para que esta pueda avanzar por su centro, de esta manera se pueden guiar las señales luminosas sin pérdidas por largas distancias.

Desde la aparición de las primeras fibras, algunas de sus características han ido cambiando para mejorarla. Las características más destacables en la actualidad son:

- a) Cobertura más resistente: posee una cobertura mayor que las cubiertas convencionales
- b) Resistencias a la humedad: Para evitar que la humedad penetre en el interior, las fibras ópticas actuales cuentan con múltiples capas de protección, lo que proporciona a la fibra, una mayor vida útil y confiabilidad para su uso en lugares húmedos.
- c) Uso en interior y exterior: La fibra óptica cuentan con una resistencia alta al agua y a las emisiones ultravioleta, su cubierta resistente y el funcionamiento ambiental extendido de la fibra contribuyen a una mayor confiabilidad durante el tiempo de vida de la fibra.

2.2.3 Componentes de la Fibra Óptica

- I. El Núcleo: Principalmente se utiliza el cuarzo fundido o plástico en el cual se propagan las ondas luminosas. Diámetro: 50 o 62,5 micrómetros para la fibra multimodo y 9 micrómetros para la fibra mono modo.
- II. La Funda Óptica: Generalmente de los mismos materiales que el núcleo pero con un índice de refracción menor.
- III. El revestimiento: por lo general está fabricado en plástico y asegura la protección mecánica de la fibra.

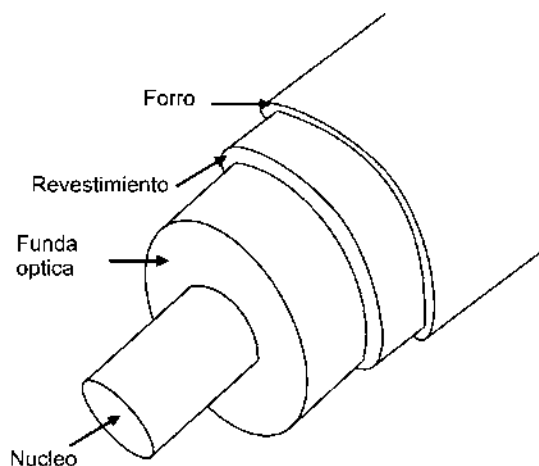


Figura 2.1 Componentes de la fibra óptica

La figura 2.1 ilustra los componentes físicos de la fibra óptica. Esencialmente, hay tres variedades de fibras ópticas disponibles actualmente. Estas variedades están construidas principalmente de vidrio, plástico o en ocasiones de una combinación de vidrio y plástico, estas tres variedades son:

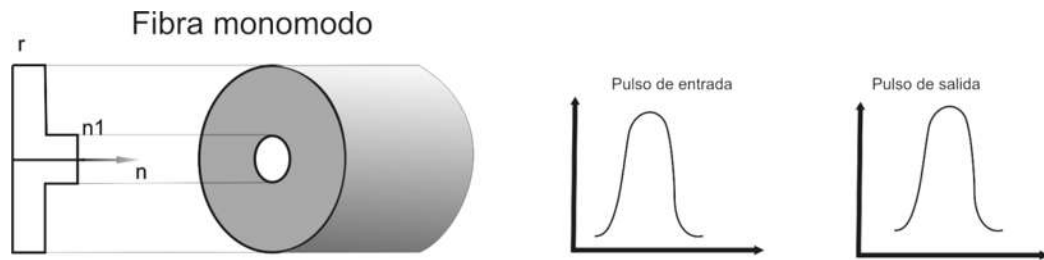
- I. El núcleo de plástico y cubierta
- II. El núcleo de vidrio con cubierta de plástico, frecuentemente llamada fibra PCS (sílice-cubierta-de plástico)
- III. El núcleo de vidrio y cubierta de vidrio frecuentemente llamadas SCS, sílice-cubierta-de sílice).

2.2.4 Tipos de fibras ópticas

Los modos de propagación en el interior de una fibra óptica, se definen como las trayectorias que puede seguir un haz de luz. Según el modo de propagación se tienen tres tipos diferentes de fibra óptica: fibra mono modo, multimodo y la fibra multimodo de índice graduado.

2.2.5 Fibras mono modo

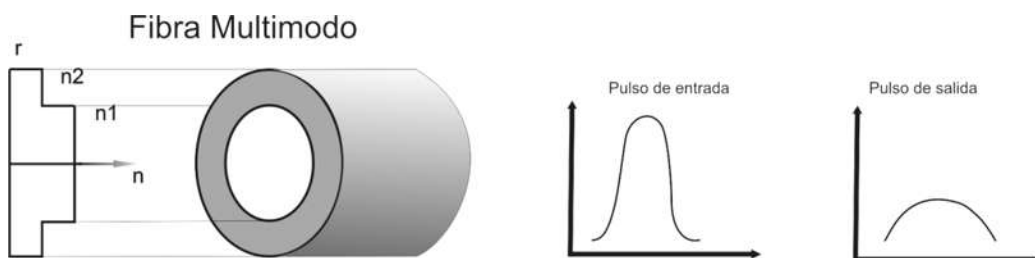
Potencialmente, esta es la fibra que ofrece la mayor capacidad de transporte de información. Tiene una banda de paso del orden de los 100 GHz/km. Los mayores flujos se consiguen con esta fibra, pero también es la más compleja de implantar. Este tipo de fibra ofrece una dispersión mínima. Debido a que todos los rayos que se propagan por la fibra toman aproximadamente la misma trayectoria y tardan aproximadamente la misma cantidad de tiempo en viajar por el cable. En consecuencia, un pulso de luz enviado puede reproducirse de manera muy exacta en el lado del receptor. La figura 2.2, muestra la fibra mono modo.

**Figura 2.2** Fibra monomodo

Las principales desventajas se deben precisamente a que en este tipo de fibra su núcleo central es muy pequeño, lo cual hace difícil acoplar la luz dentro de su interior, por lo tanto, para acoplar la luz correctamente en este tipo de fibra se necesita una fuente de luz altamente directiva como la de un laser. Este tipo de fibra es de las más costosas y difíciles de fabricar.

2.2.6 Fibras multimodo

Este tipo de fibra es barata y sencilla de fabricar, además acoplar la luz dentro de este tipo de fibra es mucho más sencillo en comparación con la fibra mono modo ya que la fibra multimodo tiene una apertura de fuente relativamente grande. Además, como su nombre lo sugiere la fibra multimodo permite que los haces de luz que viajan en su interior puedan circular por más de un modo o camino. Esto supone que no llegan todos a la vez. La figura 2.3 ilustra una fibra óptica multimodo.

**Figura 2.3** Fibra multimodo

2.2.7 Fibras multimodo de índice graduado

Una fibra de índice graduado multimodo se caracteriza por un núcleo central que tiene un índice refractivo que no es uniforme; se caracteriza por que está al máximo en el centro y disminuye gradualmente hasta la orilla exterior. En este tipo de fibra óptica el núcleo esta hecho de varias capas concéntricas de material óptico con diferentes índices de refracción. La luz se propagará por este tipo de fibra por medio de la refracción, la propagación de los rayos en este tipo de fibra siguen un patrón similar. En estas fibras el número de rayos ópticos diferentes que viajan es menor y, por lo tanto, sufren menos el severo problema de las multimodales. La figura 2.4, representa la fibra de índice graduado.

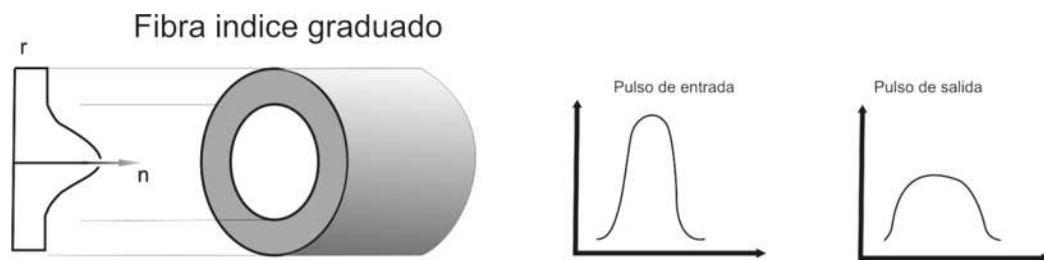


Figura 2.4 Fibra multimodo de índice graduado

Realmente, no existen ventajas o desventajas importantes en este tipo de fibra, este tipo de fibras son más fáciles de acoplar la luz, dentro y fuera en comparación que las fibras mono modo, sin embargo es más difícil de acoplar la luz que en las fibras multimodo. La distorsión debida a las trayectorias de propagación múltiple es mayor que en las fibras mono modo, pero menor que en las fibras multimodo. Este tipo de fibra es más fácil de fabricar que las mono modo pero es más difícil de fabricar que la fibra multimodo. Por lo tanto, la fibra de índice graduado multimodo se considera una fibra intermedia comparada con la de los tipos anteriormente mencionados.

2.2.8 Modo de propagación dentro de una fibra óptica.

La luz puede propagarse por un cable de fibra óptica, por medio de los fenómenos conocidos como; reflexión o refracción, la forma como se propague la luz dentro de la fibra depende del modo de propagación y del perfil de índice de la fibra.

Fenómeno de reflexión

La reflexión de la luz es el cambio de dirección que experimenta un rayo luminoso al chocar contra la superficie de los cuerpos. El rayo de luz que incide sobre una superficie, se describe por el ángulo que forma respecto a la normal, el cual se conoce como ángulo de incidencia, a este rayo lo llamamos rayo incidente. Al igual que el rayo incidente, el rayo de luz reflejado se puede describir por el ángulo que forma respecto a la normal, a este rayo lo llamamos rayo reflejado, mientras que al ángulo lo llamamos ángulo reflejado. La figura 2.5 muestra el fenómeno de la reflexión.

El fenómeno de la reflexión de la luz cumple dos leyes esenciales:

- a) El rayo incidente, el reflejado y la normal se encuentran en un mismo plano perpendicular a la superficie
- b) El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión

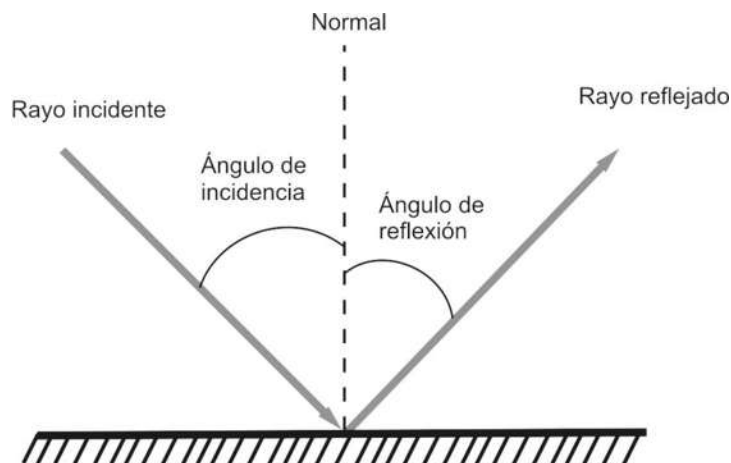


Figura 2.5 Fenómeno de reflexión

Fenómeno de refracción

Cuando la luz pasa de un medio transparente a otro se produce un cambio en su dirección debido a la distinta velocidad de propagación que tiene la luz en los diferentes medios materiales. A este fenómeno se le llama refracción.

Este fenómeno puede apreciarse cuando se sumerge parcialmente un lápiz en un vaso con agua el lápiz parece quebrado, en la parte donde hace contacto con la superficie del liquido. La figura 2.6 muestra un lápiz sumergido en un vaso con agua, el cual demuestra el fenómeno de la refracción.

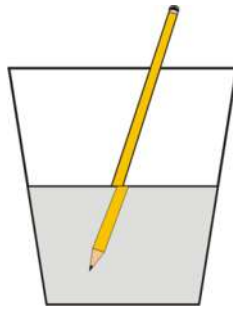


Figura 2.6 Fenómeno de refracción

Índice de Refracción

La cantidad de refracción que ocurre en la superficie de dos materiales, de densidades diferentes, es bastante predecible y depende del índice de refracción de los materiales. Este índice de refracción es simplemente la relación de la velocidad de propagación del haz de luz en el espacio libre con la velocidad de propagación de un haz de luz en un material específico, matemáticamente el índice de refracción se representa de la siguiente manera:

$$n = \frac{c}{v}$$

Donde:

n : Índice de refracción

c : Velocidad de la luz en el vacio (300, 000,000 m/s)

v : Velocidad de la luz en el medio material

Leyes de la Refracción

Al igual que las leyes de reflexión, las de la refracción poseen un fundamento experimental. Junto con los conceptos de rayo incidente, normal y ángulo de incidencia, es necesario considerar ahora el rayo refractado y el ángulo de refracción el cual es el ángulo que forma la normal y el rayo refractado.

Primera ley

El rayo incidente, la normal y el rayo refractado pertenecen a un mismo plano.

Segunda ley (ley de Snell)

Los senos de los ángulos de incidencia θ_1 y de refracción θ_2 son directamente proporcionales a la razón entre la velocidad de la onda en el primer medio y la velocidad de la onda en el segundo medio, o bien la ley de Snell puede entenderse como el producto del índice de refracción del primer medio por el seno del ángulo de incidencia es igual al producto del índice de refracción del segundo medio por el seno del ángulo de refracción del segundo medio. La figura 2.7 muestra gráficamente el significado de la ley de Snell.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

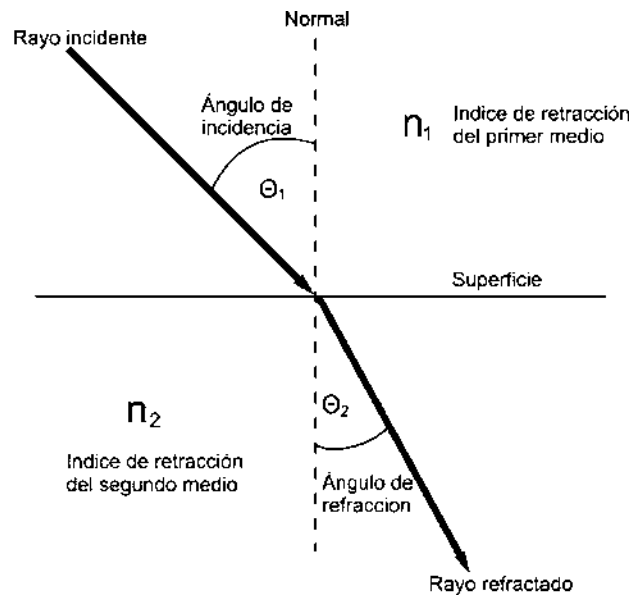
Donde:

n_1 = Índice de refracción del primer medio

θ_1 = Ángulo de Incidencia

n_2 = Índice de refracción del segundo medio

θ_2 = Angulo de refracción

**Figura 2.7** Ley de Snell

2.2.9 Ángulo Crítico

Se define ángulo crítico, el ángulo a partir del cual no existe refracción y toda la luz incidente es reflejada al mismo medio del que procede. Sólo puede producirse reflexión total cuando un haz de luz está viajando desde un medio más denso a un medio menos denso. Si el ángulo de refracción es de 90° o más, al rayo de luz no se le permite penetrar al material menos denso. En consecuencia, una reflexión total se realiza en la interface, y el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia.

La figura 2.8 muestra una condición en la cual un haz incidente está en un ángulo, de tal manera, que el ángulo de refracción es 90° y el haz refractado está a lo largo de la interface, usando la ley de Snell, podemos calcular el ángulo crítico:

$$\text{sen } \theta_1 = \frac{n_2}{n_1} \text{sen } \theta_2$$

Con $\theta_2 = 90^\circ$,

$$\text{sen } \theta_1 = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\sin^{-1} = \frac{n_2}{n_1} = \theta_1 = \theta_c$$

Donde θ_c es el ángulo crítico.

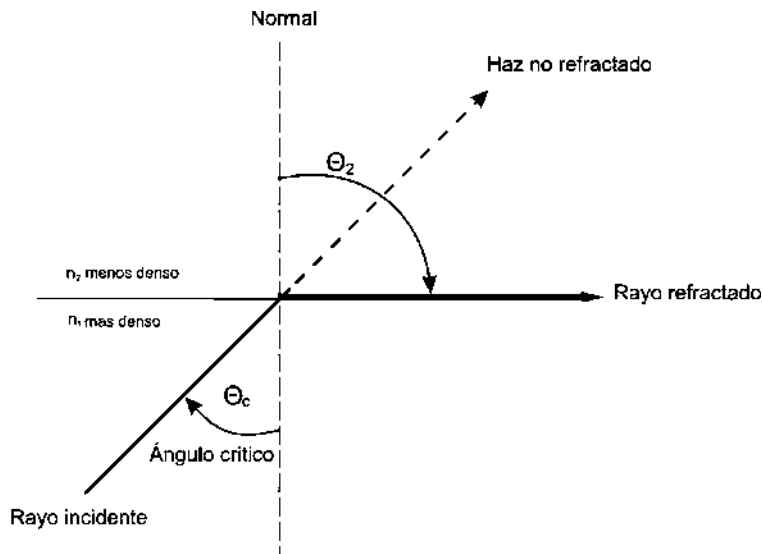


Figura 2.8 Refracción de ángulo crítico

2.2.10 Reflexión total interna

Una fibra óptica es una estructura diseñada para conducir luz sobre una distancia o dirección, la cual no es necesariamente en línea recta. Básicamente la fibra óptica está compuesta por una región cilíndrica a través de la cual se efectúa la propagación, denominada reflexión total interna. La figura 2.9 representa gráficamente el fenómeno de la reflexión total interna.

Cuando la luz pasa de un medio más denso a otro menos denso puede ser reflejada internamente. Cuando el ángulo de incidencia del rayo luminoso es mayor que el valor del llamado ángulo crítico la luz se refleja internamente totalmente. Matemáticamente la reflexión total interna se produce cuando:

$$\theta_2 > \theta_c$$

Si esto se cumple, la luz no se transmite al segundo medio.

Donde:

θ_2 : Ángulo de refracción

θ_c : Angulo crítico.

La reflexión total interna se rige por dos factores:

- Los índices de refracción de los dos medios n_1 y n_2 .
- El ángulo critico θ_c .

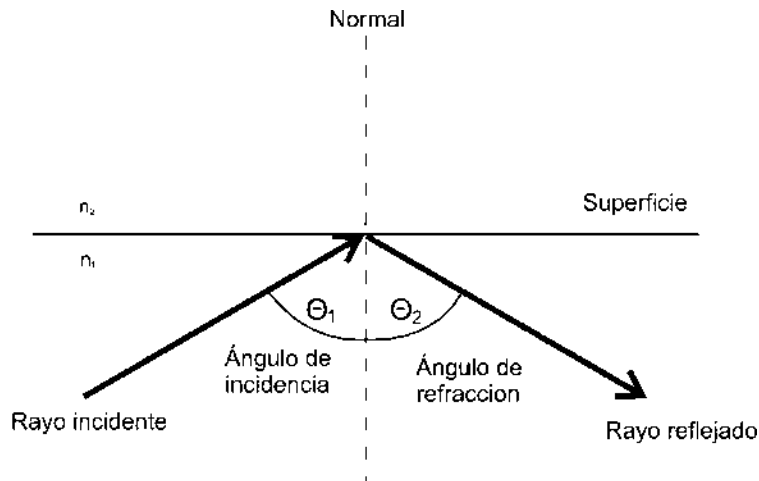


Figura 2.9 Reflexión total interna

Figura: Reflexión total interna $\theta_2 > \theta_c$

2.2.11 Perfil de índice

El perfil de índice, de una fibra óptica, es una representación gráfica del valor del índice refractivo, a través de la fibra. Este índice refractivo está indicado en el eje horizontal y la distancia radial del eje del núcleo se gráfica en el eje vertical.

Hay dos tipos básicos de perfiles de índice: escalón y graduado. Una fibra de índice de escalón tiene un núcleo central, con un índice refractivo uniforme, menor al del núcleo central. En una fibra de índice graduado no hay cubierta, el índice refractivo del núcleo no es uniforme; está más alto en el centro y disminuye gradualmente con la distancia hacia el borde externo.

La figura 2.10 muestra los perfiles de índice de tres tipos de cable de fibra óptica, diferentes.

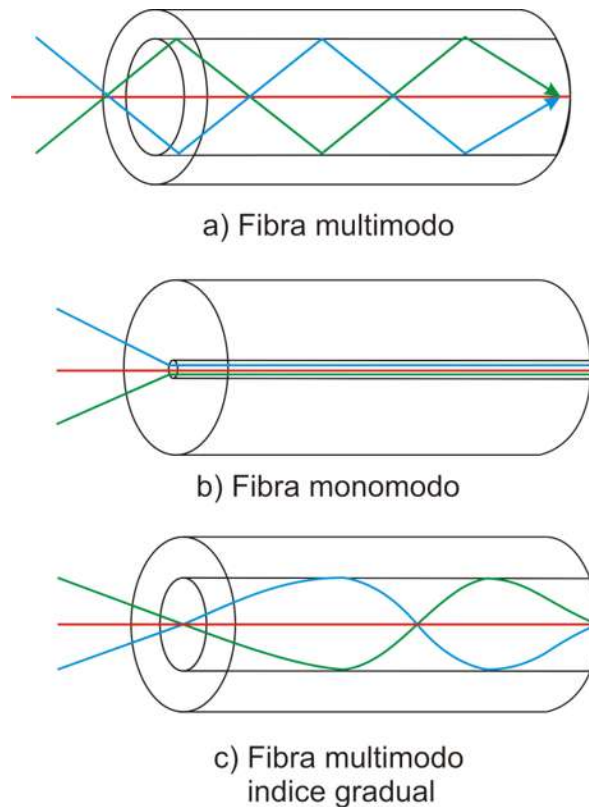


Figura 2.10 Perfiles de índice

2.2.12 Angulo y cono de aceptación.

Un haz de luz puede entrar a la fibra óptica si dicho haz se halla contenido dentro de un cierto ángulo denominado cono de aceptación. Un rayo de luz puede perfectamente no ser transportado por la fibra óptica si no cumple con el requisito del cono de aceptación. El cono de aceptación está directamente asociado a los materiales con los cuales la fibra óptica ha sido construida.

Cuando los rayos de luz entran a la fibra, chocan a la interface de aire/vidrio, en la normal A. El índice refractivo del aire es 1 y el índice refractivo del núcleo del vidrio es 1.5. En consecuencia, la luz que entra en la interface de aire/vidrio se propaga de un medio menos denso a un medio más denso. Bajo estas condiciones y de acuerdo a la ley de Snell, los rayos de luz se retractarán hacia la normal. Esto causa que los rayos de luz cambien de dirección y se propaguen diagonalmente por el núcleo a un ángulo (θ_c) que es diferente que el ángulo de incidencia externo en la interface de aire/vidrio ($\theta_{entrada}$). Para

que un rayo pueda propagarse por un cable, debe chocar a la interface de núcleo/cubierta interno en un ángulo que sea mayor que el ángulo crítico (θ_c). La figura 2.11 muestra el lado de la fuente de un cable de fibra óptica.

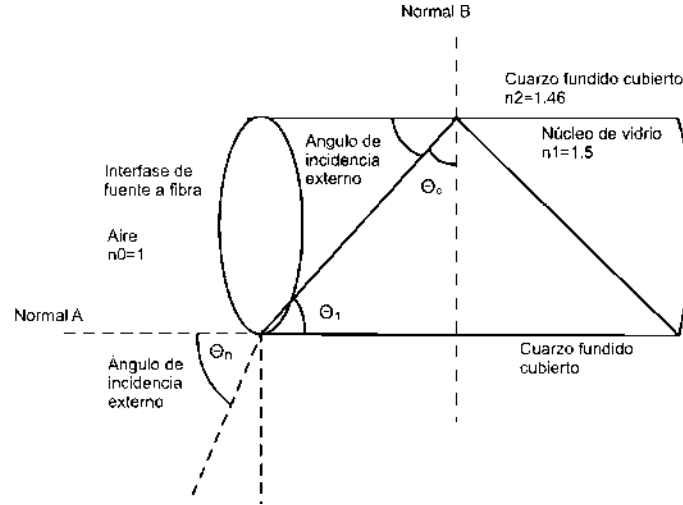


Figura 2.11 Propagación del rayo dentro y debajo de un cable de fibra óptica

2.2.13 Apertura numérica

Es un parámetro que da idea de la cantidad de luz que puede ser guiada por una fibra óptica. Por lo tanto, cuanto mayor es la magnitud de la apertura numérica de una fibra, mayor es la cantidad de luz que puede guiar o lo que es lo mismo, más cantidad de luz es capaz de aceptar en su núcleo. Para una fibra de índice de escalón, una apertura numérica se define matemáticamente como el seno del medio ángulo de aceptación. Por lo tanto

$$NA = \text{sen } \theta_{\text{entrada}}$$

El caso anterior para una fibra de índice escalón, para una fibra de índice graduado, NA es simplemente el seno del ángulo crítico.

$$NA = \text{sen } \theta_c$$

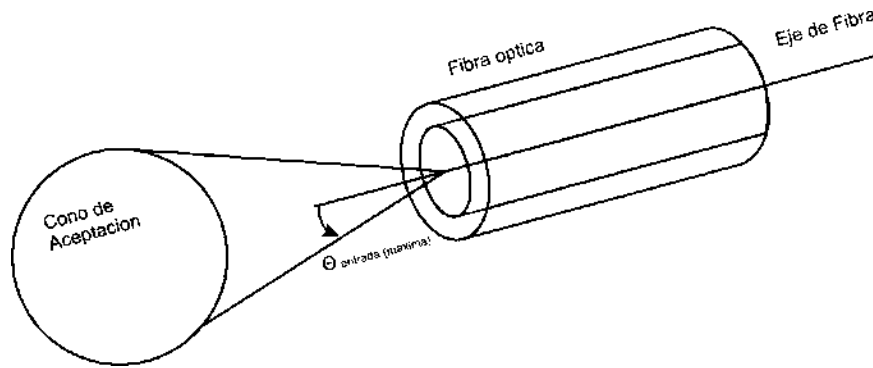


Figura 2.12 Cono de aceptación de un cable de fibra óptica

Ocasionalmente la apertura numérica se da en términos de la diferencia de índice de refracción negativo la cual se obtiene de,

$$NA = N_1 \sqrt{2A}$$

Sin embargo las expresiones encontradas son independientes del diámetro del núcleo de la fibra, por lo tanto para diámetros menores a $8\mu m$ el modelo de la teoría del rayo no es válido, debido a que no toma en cuenta la interferencia de los componentes que forman la fibra, para estos casos es más conveniente aplicar la teoría de modo electromagnético. La figura 2.12 detalla el cono de aceptación que contiene una fibra óptica.

2.2.14 Pérdidas en fibra óptica

Las pérdidas de transmisión en los cables de fibra óptica son una de las características más importantes de la fibra. Las pérdidas en la fibra resultan en una reducción de la potencia de la luz, por lo tanto, reducen el ancho de banda del sistema, la velocidad de transmisión de información, eficiencia, y capacidad total del sistema. Las pérdidas de fibra predominantes son las siguientes:

1. Pérdidas por absorción
2. Pérdidas por dispersión de Rayleigh o materiales

3. Dispersión Mie
4. Dispersión cromática o de longitud de onda
5. Pérdidas por curvatura
6. Dispersión modal
7. Pérdidas por acoplamiento

2.2.14.1 Pérdidas por absorción

La absorción del material es un mecanismo de pérdida relacionada a la composición del material y al proceso de fabricación de la fibra, el cual resulta en la disipación de una parte de la potencia óptica transmitida como calor.

El vidrio usado para fabricar las fibras ópticas es aproximadamente 99.99999% puro. Aun así, las pérdidas por absorción entre 1 y 1000 dB/km son típicas, esencialmente, hay tres factores que contribuyen a las pérdidas por absorción en las fibras ópticas:

- I. Absorción ultravioleta.
- II. Absorción infrarroja.
- III. Absorción de resonancia del ion.

Absorción ultravioleta. La absorción ultravioleta es provocada por electrones de valencia en el material de silicio del cual se fabrican las fibras. La luz ioniza a los electrones de valencia en conducción. La ionización es equivalente a la pérdida total del campo de luz y, en consecuencia, contribuye a las pérdidas de transmisión de la fibra.

Absorción infrarroja. La absorción infrarroja es un resultado de fotones de luz que son absorbidos por los átomos de las moléculas, en el núcleo de vidrio. Los fotones absorbidos se convierten a vibraciones mecánicas aleatorias típicas de calentamiento.

Absorción de resonancia de ion. La absorción de resonancia de ion es causada por los iones OH⁻ en el material. La fuente de los iones OH⁻ son las moléculas de agua que han sido atrapadas en el vidrio, durante el proceso de fabricación. La absorción del ion también será causada por las moléculas de hierro, cobre y cromo.

2.2.14.2 Pérdidas por dispersión de Rayleigh

La dispersión Rayleigh es el mecanismo de pérdida dominante en la ventana de absorción baja entre la ultravioleta y la parte baja de la infrarroja. Esta dispersión es debida a heterogeneidades de naturaleza casual que se presenta en pequeña escala comparada con la longitud de onda de la luz. Estas heterogeneidades se producen por cambios en el índice de refracción y variaciones en la composición del núcleo.

Durante el proceso de fabricación, el vidrio es producido en fibras largas, de un diámetro muy pequeño. Durante este proceso, el vidrio está en un estado plástico (no líquido y no sólido). La tensión aplicada al vidrio durante, este proceso, causa que el vidrio se enfríe y desarrolle irregularidades submicroscópicas que se forman, de manera permanente, en la fibra. Cuando los rayos de luz que se están propagando por una fibra chocan contra una de estas impurezas, se difractan.

La difracción causa que la luz se disperse o se reparta en muchas direcciones. Una parte de la luz difractada continua por la fibra y parte de ésta se escapa por la cubierta. Los rayos de luz que se escapen representan una pérdida en la potencia de la luz. Esto se llama pérdida por dispersión de Rayleigh. La figura 2.13 muestra la relación entre la longitud de onda y la perdida por dispersión de Rayleigh.

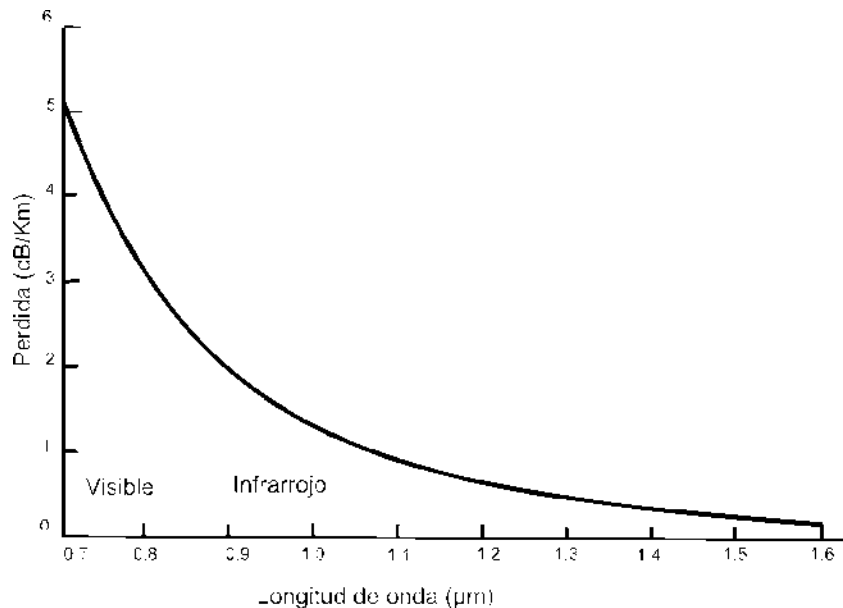


Figura 2.13 Pérdida de dispersión de Rayleigh como una función de longitud de onda.

2.2.14.3 Pérdidas por dispersión Mie

Esta dispersión se tiene en no-homogeneidad, las cuales son comparables en tamaño de la longitud de onda guiada. Esto se debe a una estructura cilíndrica no perfecta originando irregularidades en el núcleo y el revestimiento, con sus correspondientes pérdidas. La dispersión de Mie puede ocasionar pérdidas significativas dependiendo del material de la fibra, diseño o fabricación.

2.2.14.4 Dispersión cromática o de longitud de onda

El índice refractivo del material es dependiente de la longitud de onda. Los diodos emisores de luz (LED) emiten luz que contiene una combinación de longitudes de onda. Cada longitud de onda, dentro de una señal de luz compuesta, viaja a una velocidad diferente. En consecuencia, los rayos de luz que simultáneamente se emiten de un LED y se propagan por una fibra óptica no llegan, al extremo lejano de la fibra, al mismo tiempo. Esto resulta en una señal de recepción distorsionada; la distorsión se llama, distorsión cromática. La distorsión cromática se puede eliminar usando una fuente monocromática tal como un diodo de inyección láser (ILD).

2.2.14.5 Pérdidas por curvatura de la fibra

Las pérdidas por curvaturas se producen cuando le damos a la fibra una curvatura excesivamente pequeña (radio menor a 4 o 5 cm) la cual hace que los haces de luz logren escapar del núcleo, por superar el ángulo máximo de incidencia admitido para la reflexión total interna y en consecuencia se produce una fuga de modos hacia el revestimiento, esta curva excesiva se conoce como macro curvatura. La figura 2.14 muestra este fenómeno.

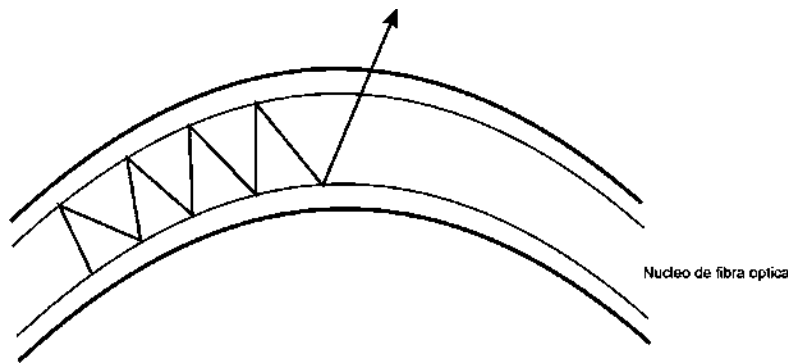


Figura 2.14 Macro curvatura

También se dan cuando, al aumentar la temperatura y debido a la diferencia entre los coeficientes de dilatación térmica entre fibras y buffer, las fibras se curvan dentro del tubo.

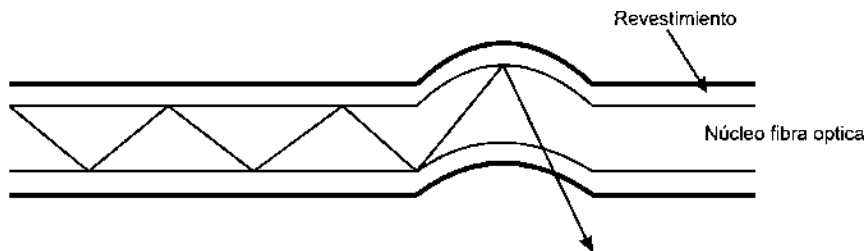


Figura 2.15 Micro curvatura

La fuga de modos en el revestimiento intenta viajar más rápido que los modos de la onda guiada, como esto no es posible la energía asociada con esta parte del modo es pérdida a través de radiación.

Como se puede apreciar, estas pérdidas pueden ser reducidas si se diseñan fibras con una diferencia de índice de refracción relativa alta, así se puede operar a la más baja longitud de onda posible.

2.2.14.6 Dispersión modal

La dispersión es el fenómeno de separación de las ondas de distinta frecuencia al atravesar un material. Todos los medios materiales son más o menos dispersivos, y la dispersión afecta a todas las ondas.

La dispersión modal o esparcimiento del pulso, es causado por la diferencia en los tiempos de propagación de los rayos de luz que toman diferentes trayectorias por una fibra. Obviamente, la dispersión modal puede ocurrir sólo en las fibras de multimodo. Se puede reducir considerablemente usando fibras de índice graduado y casi se elimina totalmente usando fibras de índice de escalón de modo sencillo.

La dispersión modal puede causar que un pulso de energía de luz se disperse conforme se propaga por una fibra. Si el pulso que está esparciéndose es lo suficientemente severo, un pulso puede caer arriba del próximo pulso (este es un ejemplo de la interferencia de intersímbolo). En una fibra de índice de escalón multimodo, un rayo de luz que se propaga por el eje de la fibra requiere de la menor cantidad de tiempo para viajar a lo largo de la fibra. Un rayo de luz que choca a la interface de núcleo/cubierta en el ángulo crítico sufrirá el número más alto de reflexiones internas y, en consecuencia, tomar la mayor cantidad de tiempo para viajar a lo largo de la fibra.

La figura 2.16 muestra tres rayos de luz propagándose por una fibra de índice de escalón de multimodo. El modo de orden más bajo (rayo 1) viaja en una trayectoria paralela al eje de la fibra. El modo de orden mediano (rayo 2) rebota varias veces en la interface, antes de viajar a lo largo de la fibra. El modo de orden más alto (rayo 3) hace muchos viajes de ida y vuelta, a través de la fibra, conforme se propaga por toda la longitud. Puede observarse que el rayo 3 viaja una distancia considerablemente más larga que el rayo 1, conforme se propaga por la fibra. En consecuencia, si los tres rayos de luz fueran emitidos de la fibra al mismo tiempo y representaran un pulso de energía de luz, los tres rayos alcanzarían el extremo lejano de la fibra en tiempos diferentes y resultarían en una dispersión de la energía de la luz, con respecto al tiempo. Esto se llama dispersión modal y resulta en un pulso estirado que también se reduce en amplitud en la salida de la fibra. Los tres rayos de luz se propagan, por el mismo material, a la misma velocidad, pero el rayo 3 debe viajar una distancia más larga y, en consecuencia, requiere de un periodo más largo para propagarse por la fibra

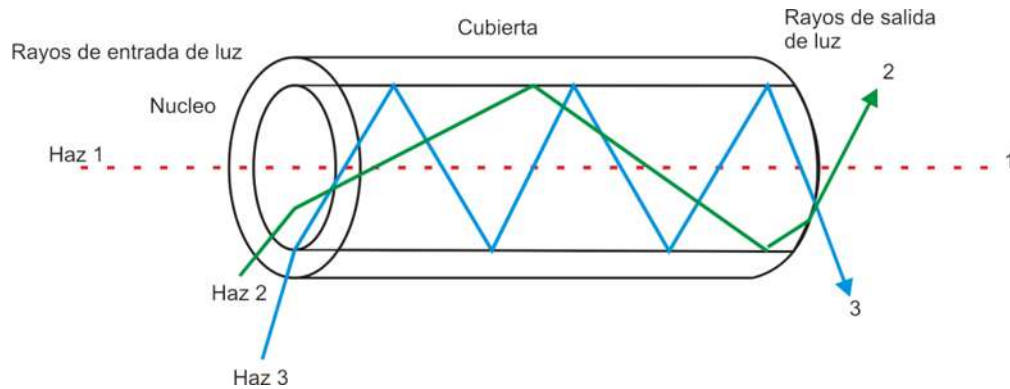


Figura 2.16 Propagación de la luz por una fibra de índice escalón multimodo

2.2.14.7 Pérdidas por acoplamiento

Cuando empalmamos una fibra con otra, en la unión se produce una variación del índice de refracción lo cual genera reflexiones y refracciones, y sumándose la presencia de impurezas, todo esto resulta en una atenuación.

En caso de que los núcleos no se empalmen perfecta y uniformemente, una parte de la luz que sale de un núcleo no incide en el otro núcleo y se pierde. Por tanto las pérdidas que se introducen por esta causa pueden constituir un factor muy importante en el diseño de sistemas de transmisión, particularmente en enlaces de telecomunicaciones de gran distancia

En los cables de fibra las pérdidas de acoplamiento pueden ocurrir en cualquiera de los tres tipos de uniones ópticas: conexiones de fuente a fibra, conexiones de fibra a fibra y conexiones de fibra a fotodetector. Las pérdidas de unión son causadas más frecuentemente por uno de los siguientes problemas de alineación: mala alineación lateral, mala alineación de separación, mala alineación angular y acabados de superficie imperfectos.

Mala alineación lateral. Esto es el desplazamiento axial o lateral entre dos piezas de cables de fibra contiguas. La cantidad de pérdida puede ser desde un par de décimas de un decibel a varios decibels. Esta pérdida generalmente es insignificante si los ejes de la fibra están alineados dentro del 5% del diámetro más pequeño de la fibra. La figura 2.17 ilustra la mala alineación que puede existir en un acoplamiento de fibra óptica.

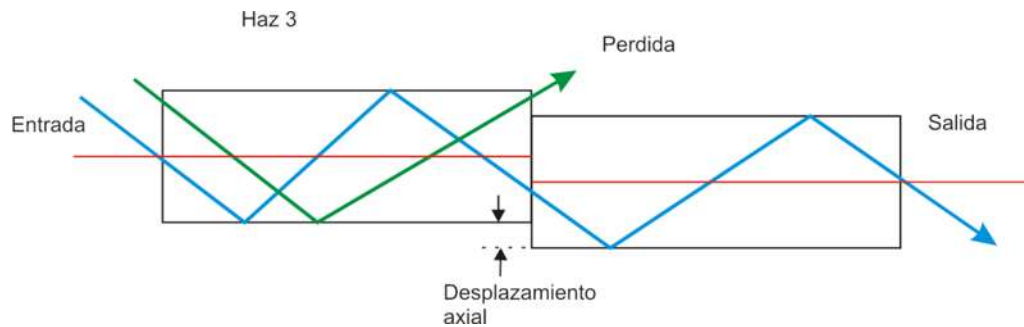


Figura 2.17 Mala alineación lateral

Mala alineación de la separación. Esta a veces se llama, separación de la extremidad. Cuando los empalmes se hacen en la fibra óptica, las fibras deben tocarse. Entre más separadas estén las fibras, mayor es la pérdida de la luz. Si dos fibras están unidas con un conector, las puntas no deben tocarse. Esto se debe a que las puntas frotándose una con otra en el conector, causarían daño a cualquiera o ambas fibras. La figura 2.18 ilustra la mala alineación por separación dentro de una fibra óptica.

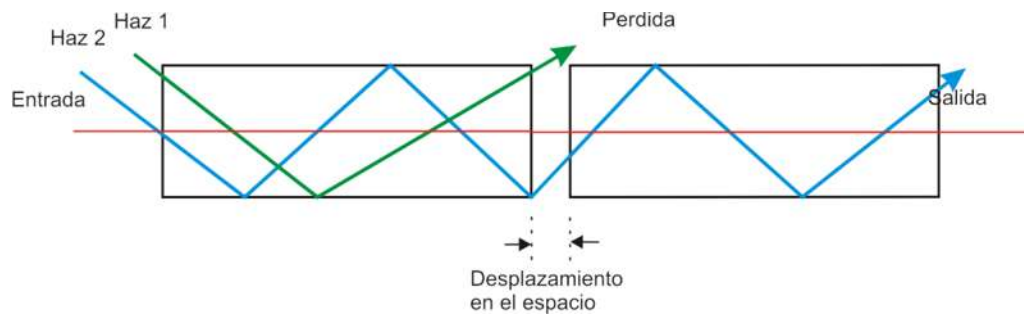


Figura 2.18 Mala alineación de la separación

Mala alineación angular. Esto veces se llama desplazamiento angular. Si el desplazamiento angular es menor que $2'$, la pérdida será menor que 0.5 dB. La figura 2.19 ilustra la mala alineación angular que puede existir en un acoplamiento de fibra óptica.

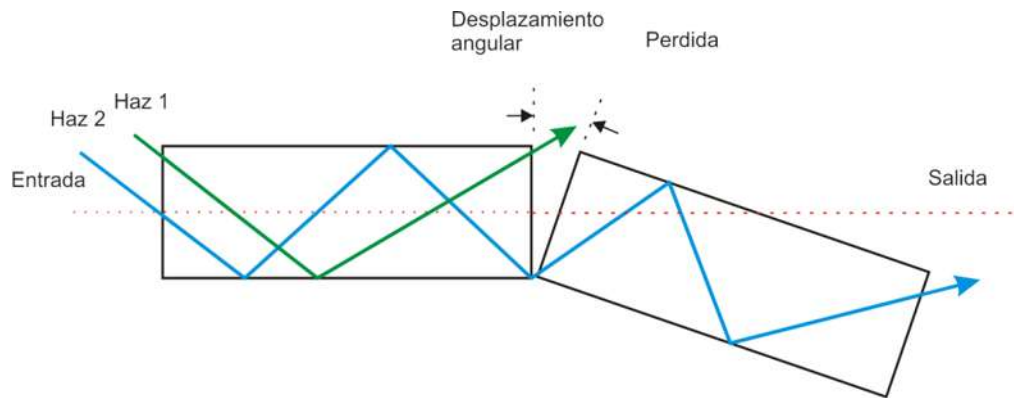


Figura 2.19 Mala alineación angular

Acabado de superficie imperfecta. Las puntas de las dos fibras unidas deben estar altamente pulidas y encuadrarse juntas adecuadamente. Si las puntas de la fibra están a menos de 3' de la perpendicular, las pérdidas serán menores que 0.5 dB. La figura 2.20 muestra algunas de las imperfecciones que pueden existir en un acoplamiento de fibra óptica.

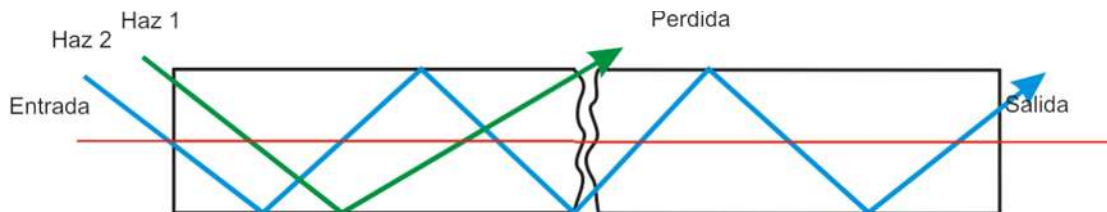


Figura 2.20 Superficie imperfecta

2.2.15 Fuentes de luz

La fuente de luz de fibra óptica ha mejorado dramáticamente en las últimas décadas. Estos avances han aumentado considerablemente las tasas de transmisión de datos y reducción de costos. Esencialmente un diodo emisor de luz (LED) simplemente es un diodo de unión P-N. Normalmente está echo de un material semiconductor. Los LED emiten luz por emisión espontanea; la luz se emite como resultado de la recombinación de electrones y huecos. Cuando se polariza directamente, los portadores minoritarios son

inyectados a través de la unión p-n. Una vez a través de la unión, estos portadores minoritarios se recombinan con los portadores mayoritarios y ceden energía en forma de luz. Este proceso esencialmente es igual que en el diodo convencional, excepto que en los LED ciertos materiales semiconductores y dopadores son elegidos de tal manera que el proceso es radiactivo; se produce un fotón.

Un fotón es un quantum de energía de onda electromagnética. Los fotones son partículas que viajan a la velocidad de la luz, pero en reposo no tienen masa, a diferencia de los diodos semiconductores convencionales (germanio y silicio), el proceso es principalmente sin radiación y ningún fotón se generara. El espacio de energía del material usado para construir un LED, determina si la luz emitida por este es invisible o visible y de qué color.

Los diodos emisores de luz y los diodos láser son fuentes adecuadas para la transmisión mediante fibra óptica, debido a que su salida se puede controlar rápidamente por medio de una corriente de polarización. Además su pequeño tamaño, su luminosidad, longitud de onda y el bajo voltaje necesario para manejarlos son características atractivas.

2.2.16 Características que deben cumplir los LED

- I. Operar en las longitudes de onda en que la fibra posee baja pérdida y poca dispersión.
- II. Eficiencia alta en las dos en que los receptores operan óptimamente.
- III. Potencia de salida preferentemente de más de 1 mWatt.
- IV. Operar en condiciones de temperatura ambiente.
- V. Deben poder ser moduladas a frecuencia hasta del orden de GHz
- VI. Tamaño y configuración compatibles con la fibra óptica.
- VII. Bajo costo.

Los dos tipos básicos de LED utilizados para extraer luz de una unión *p-n* son los de *emisión de superficie* y los de *emisión de borde*.

LED de emisión de superficie. Para aplicaciones más prácticas, tales como las telecomunicaciones, se requieren velocidades de datos de 100 Mbps en exceso. Este tipo

de LED fue desarrollado para estas aplicaciones, este emisor superficial emite luz en muchas direcciones, ayuda a concentrar la luz emitida en un área muy pequeña. Además pueden colocarse lentes en forma de domo sobre la superficie emisora para dirigir la luz a un área más pequeña. Se deben procurar, ya que este tipo de LED cuenta con procedimientos de acoplamiento eficaz con las fibras ópticas, particularmente si éstas son de apertura numérica pequeña. La figura 2.21 muestra un LED de emisión superficial típico

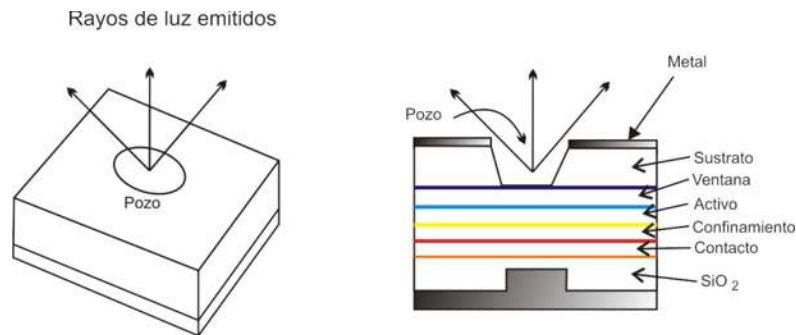


Figura 2.21 LED de emisión superficial

LED emisor de borde. En el LED de emisión de bordes, la luz se emite en un patrón de luz más direccional que los LED emisores de superficie, con lo que la absorción es muy pequeña. La emisión de bordes es direccional si se usa geometría de franja. Esta estructura permite un mejor rendimiento cuántico externo y un acoplamiento a las fibras más eficaz. Los emisores LED superficiales son más comúnmente usados que los emisores de borde, porque emiten más luz. Sin embargo, las pérdidas por la conexión con los emisores superficiales son mayores y tienen anchos de banda más angostos. La figura 2.22 muestra un LED de emisor de borde.

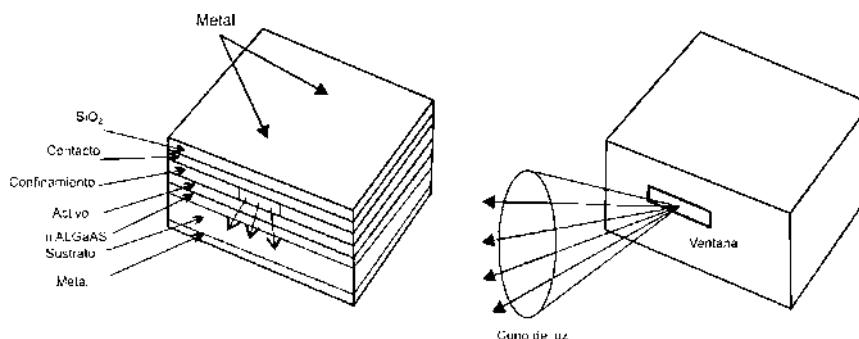


Figura 2.22 LED de emisión de borde

Diodo de inyección láser. La palabra láser es un acrónimo para la amplificación de luz por emisión estimulada de radiación. Los láseres están contruidos de muchos materiales diferentes, incluyendo gases, líquidos y sólidos, aunque el tipo de láser usado, más frecuentemente para las comunicaciones de fibra óptica es el láser semiconductor.

Los Diodos láser, emiten luz por el principio de emisión estimulada, la cual surge cuando un fotón induce a un electrón que se encuentra en un estado excitado a pasar al estado de reposo, este proceso está acompañado con la emisión de un fotón, con la misma frecuencia y fase del fotón estimulante. Para que el número de fotones estimulados sea mayor que el de los emitidos de forma espontánea, para que se compensen las pérdidas, y para que se incremente la pureza espectral, es necesario por un lado tener una fuerte inversión de portadores, la que se logra con una polarización directa de la unión, y por el otro una cavidad resonante, la cual posibilita tener una trayectoria de retroalimentación positiva facilitando que se emitan más fotones de forma estimulada y se seleccione ciertas longitudes de onda haciendo más angosto al espectro emitido.

La aplicación básica que se le ha dado al diodo LASER es como fuente de alimentación lumínica para sistemas de telecomunicaciones vía fibra óptica. El diodo láser es capaz de proporcionar potencia óptica entre 0.005-25mW, suficiente para transmitir señales a varios kilómetros de distancia y cubren un intervalo de longitud de onda entre 920 y 1650 nm. Sin embargo, para utilizar un diodo láser como fuente lumínica, es necesario diseñar un sistema de control que mantenga el punto de operación del sistema fijo, debido a que un corrimiento de este punto puede sacar al diodo fuera de operación o

incluso dañarlo. La figura 2.23 muestra los patrones de radiación de luz típicos de un LED y un LED de inyección láser (ILD). Debido a que la luz es radiada del extremo de un ILD en un rayo angosto concentrado, tiene un patrón de radiación más directo.

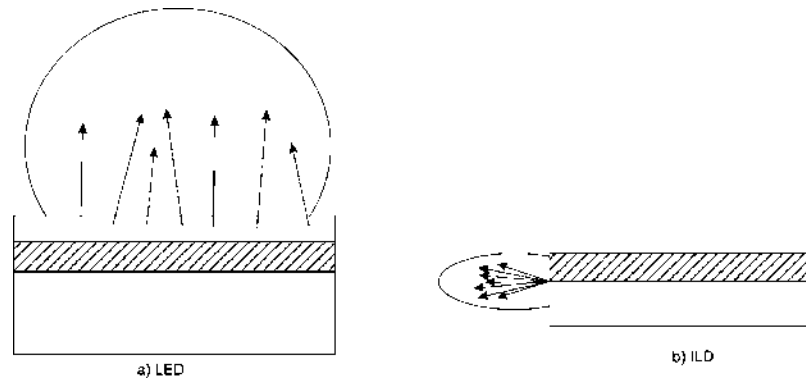


Figura 2.23 Patrones de radiación LED e ILD

Capítulo 3

DISEÑO DEL SISTEMA DE TRANSMISION

3.1 Introducción

En el presente capitulo se presenta el diseño del sistema de transmisión el cual consiste en el transmisor múltiple así como el diseño del circuito receptor múltiple, además se incluyen algunas simulaciones el cual ayudará a validar y comprobar los resultados obtenidos en las pruebas realizadas durante la realización del proyecto, estas simulaciones fueron realizadas en PROTEUS a continuación una breve introducción a los sistemas de transmisión electrónicas.

Los sistemas tradicionales de comunicaciones electrónicas utilizan técnicas de modulación analógica convencional, como la modulación en amplitud (AM), la modulación en frecuencia (FM). En esencia, las comunicaciones electrónicas son: la transmisión, la recepción y el procesamiento de la información, con el uso de circuitos electrónicos.

La transmisión digital es la transmisión de pulsos digitales, entre dos o más puntos, de un sistema de comunicación, estos sistemas requieren de un elemento físico, entre el transmisor y receptor, tales como cables metálicos, un cable coaxial, o un cable de fibra óptica. En un sistema de transmisión digital, la información de la fuente original puede ser analógica o digital, si la señal está en forma analógica esta tiene que convertirse a pulsos digitales, antes de la transmisión y convertirse de nuevo a la forma analógica en el extremo de la recepción.

3.2 Modulación de amplitud

Las señales de información deben ser transportadas entre un transmisor y un receptor sobre alguna forma de medio de transmisión. Sin embargo, las señales de información pocas veces encuentran una forma adecuada para la transmisión

La modulación se define como el proceso de transformar información de su forma original a una forma más adecuada para la transmisión. Demodulación es el proceso inverso es decir, la onda modulada se convierte nuevamente a su forma original. La modulación se realiza en el transmisor en un circuito llamado modulador, y la demodulación se realiza en el receptor en un circuito llamado demodulador.

Modulación de amplitud (AM), es el proceso de cambiar la amplitud de una portadora de frecuencia relativamente alta de acuerdo con la amplitud de la señal modulante. La cadena de transmisión de un sistema se representa en la figura siguiente.



Figura 3.1 Sistema de transmisión.

3.2.1 Generación de una señal AM

Considere una señal puramente sinusoidal, como la señal portadora la cual se describe por medio de la siguiente ecuación:

$$v(t) = A \cos(w_c t)$$

Donde:

$$w_c = 2\pi f_c$$

$$f_c = \frac{1}{T}$$

A Amplitud en volts o amperes

f_c Frecuencia en hz

w_c Pulsación en rad/seg

T Periodo

En la figura 3.2 se muestran gráficamente los componentes de una señal portadora.

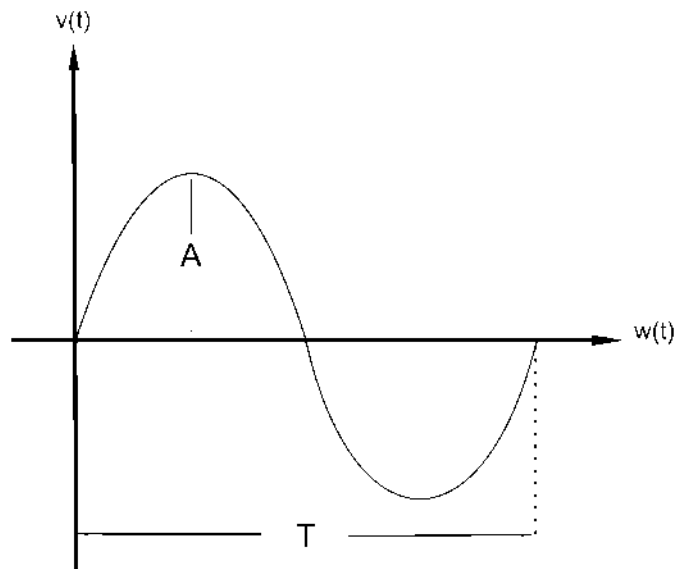


Figura 3.2 Representación de una señal senoidal

3.2.2 Modulación digital de amplitud ASK

Para la transmisión de datos digitales, existen principalmente tres métodos de modulación que permiten alterar el ancho de banda sobre el cual será enviada la información. Estos tres métodos son muy empleados debido a su relativa sencillez y a que son ideales para la transmisión de datos digitales, ellos son, el ASK (AmplitudeShiftKeying), FSK (FrequencyShiftKeying) y PSK (PhaseShiftKeying).

La modulación ASK, consiste en cambiar la amplitud de la señal senoidal entre dos valores posibles; si uno de los valores es cero se le llama OOK (On-Off keying). La aplicación más popular de ASK son las transmisiones con fibra óptica ya que es muy fácil "prender" y "apagar" el haz de luz; además la fibra soporta las desventajas de los métodos de modulación de amplitud ya que posee poca atenuación. El modulador es un simple multiplicador de los datos binarios por la portadora. A continuación en la figura 3.3 un ejemplo de un mensaje en binario y el resultado después de ser modulado.

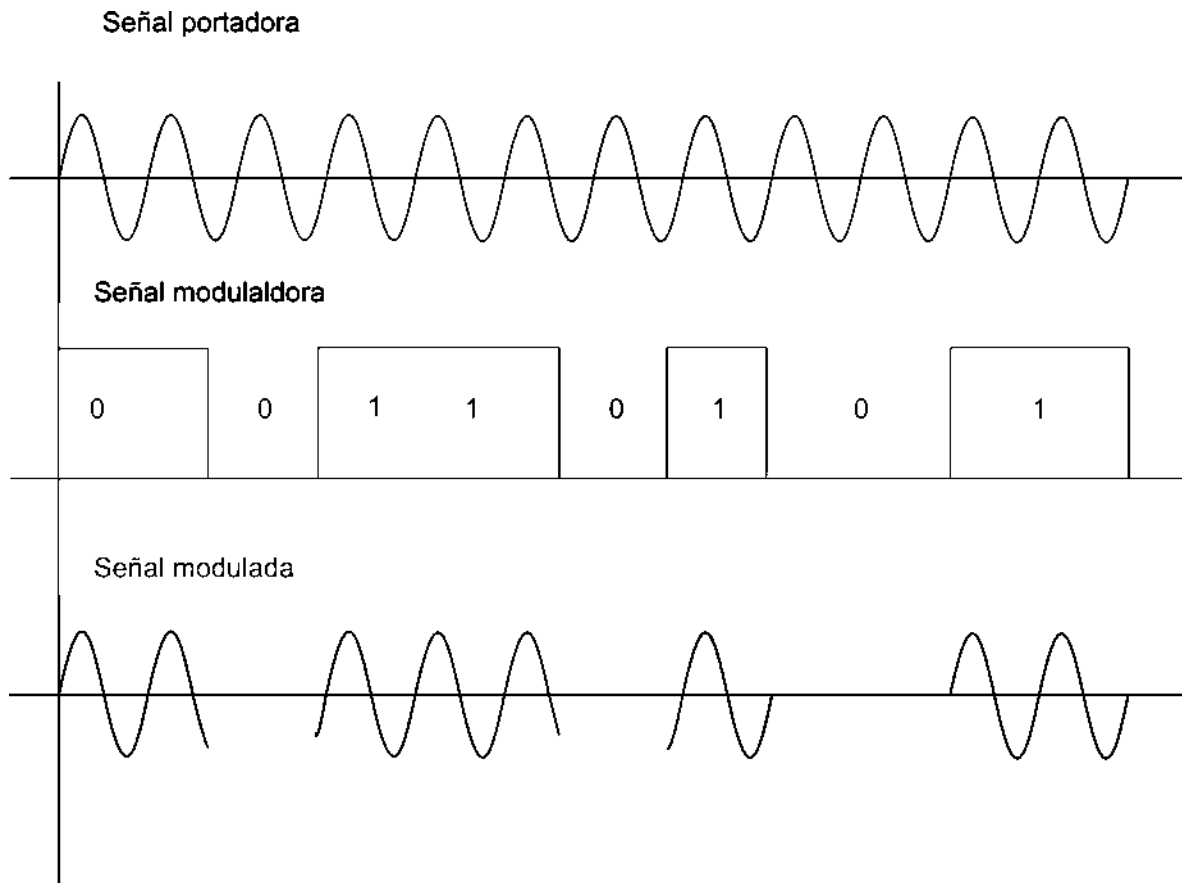


Figura 3.3 Representación de modulación ASK

Los dos valores binarios se representan con dos amplitudes diferentes y es usual que una de las dos amplitudes sea cero; es decir uno de los dígitos binarios se representa

mediante la presencia de la portadora a amplitud constante, y el otro dígito se representa mediante la ausencia de la señal portadora.

La modulación en ASK no es otra cosa que una variante de la modulación en AM que se adapta perfectamente a las condiciones de los sistemas digitales, además de que les permite trabajar sobre una sola frecuencia de transmisión en vez de tener que lidiar con pulsos cuadrados que contienen componentes en todas las frecuencias del espectro.

Su recuperación también resulta ser más sencilla, dado que sólo depende de sincronizar la frecuencia de las señales sinusoidales que sirven de portadoras y regeneradoras dependiendo si se hallan en el modulador o el demodulador.

3.3 Osciladores

La oscilación se define como la fluctuación entre dos estados o condiciones. Por lo tanto, oscilar es vibrar o cambiar, y oscilando es el acto de fluctuar entre un estado y otro. Uno de los osciladores más comúnmente usados es el péndulo de un reloj. Si empujas un péndulo para que empiece a moverse, oscilará hacia delante a una cierta frecuencia, y a continuación volverá hacia atrás de nuevo y así sucesivamente varias veces por segundo.

Un oscilador es un aparato que produce oscilaciones lo cual quiere decir que genera una forma de onda repetitiva. Los osciladores tienen muchas aplicaciones dentro de las comunicaciones electrónicas, ya que estos permiten producir portadores de alta frecuencia, alimentadores de pilotos, relojes y circuitos de sincronización. En aplicaciones electrónicas, un oscilador produce oscilaciones eléctricas, las cuales se puede definir como un cambio repetitivo de una forma de voltaje o corriente. Si un oscilador es autosuficiente, los cambios en la forma de la onda son continuos y repetitivos lo que significa que estos ocurren a intervalos periódicos, esencialmente un oscilador convierte un voltaje de entrada de corriente directa (cd) a un voltaje de salida de corriente alterna (ca). La forma de onda de salida puede ser una onda senoidal, una onda de diente de sierra, una onda cuadrada, o cualquier forma de onda mientras se repita a intervalos periódicos.

3.3.1 Funcionamiento de un oscilador

El circuito oscilante LC suele estar compuesto por una bobina o inductancia y por un capacitor, mejor conocido como circuito tanque, donde los valores de los componentes evidentemente determinan la frecuencia a la que oscilara el circuito, cuanto mayor sea el capacitor y la inductancia, menor va a ser la frecuencia. El funcionamiento de los circuitos osciladores suele ser muy similar en todos ellos; el circuito oscilante produce una oscilación, el amplificador la aumenta y la red de realimentación toma una parte de la energía del circuito oscilante y la introduce de nuevo en la entrada produciendo una realimentación positiva. La figura 3.4, representa el circuito tanque.

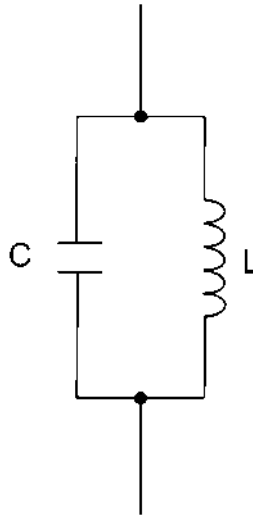


Figura 3.4 Circuito tanque

Existen muchos tipos de osciladores y cada uno suele llevar el nombre de quien lo diseñó, solo por mencionar algunos por ejemplo el oscilador **Meissner** el cual está compuesto por un circuito oscilante LC, una etapa amplificadora y una realimentación positiva. El oscilador **Hartley** la principal característica de este tipo de oscilador es que no utilizan una bobina auxiliar para la realimentación, sino que aprovechan parte de la bobina del circuito tanque dividiéndose en dos mitades, L1 y L2. El oscilador **Colpitts**, este oscilador es bastante parecido al oscilador de Hartley. La principal diferencia se produce en la forma de compensar las pérdidas que aparecen en el circuito tanque y la realimentación, para lo cual se realiza una derivación de la capacidad total que forma el circuito resonante.

Existen además una gran variedad de osciladores anteriormente sólo mencionamos los más comunes sin embargo, para el presente trabajo de tesis utilizaremos un oscilador RC ya que trabajar con inductancias es un poco más complicado debido a la poca variedad de inductancias en el mercado. Además para poder trabajar con frecuencias bajas el tamaño de las inductancias y las resistencias tendrían que ser demasiado grandes y costosos.

3.3.2 Oscilador puente de Wein

Para sustituir las inductancias, vamos a usar una red desfasadora formada por RC, es decir, resistencias y condensadores, como es el caso del oscilador en puente de Wein, el cual utiliza retroalimentación positiva y negativa. Es un circuito relativamente estable y de baja frecuencia que se sintoniza fácilmente y que se suele utilizar en los generadores de señales para producir frecuencias entre 5Hz y 1Mhz

La salida de la red de realimentación se comporta de la siguiente manera:

- o Para frecuencias por debajo la frecuencia de oscilación la atenuación es grande y la fase se adelanta 90°
- o A la frecuencia de resonancia la ganancia de tensión es de $1/3$ (máxima) y no hay corrimiento de fase.
- o Para frecuencias por encima de la frecuencia de oscilación, la atenuación es grande y la fase se atrasa 90° .

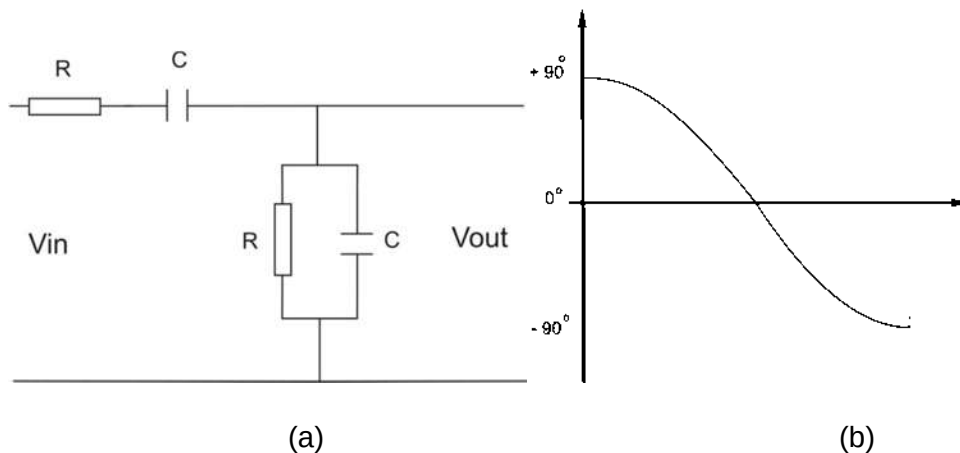


Figura 3.5 Red adelantada-atrasada: (a) Configuración del circuito; (b) curva de transferencia entrada-salida

3.4 Diseño del transmisor múltiple

Para entender mejor el objetivo de la presente tesis, se presenta a continuación un diagrama de bloques, en el cual se aprecia la intención de transmitir múltiples señales digitales, utilizando como medio de transmisión la fibra óptica en el diagrama se aprecian únicamente dos señales aunque el sistema puede transmitir un mayor número de señales

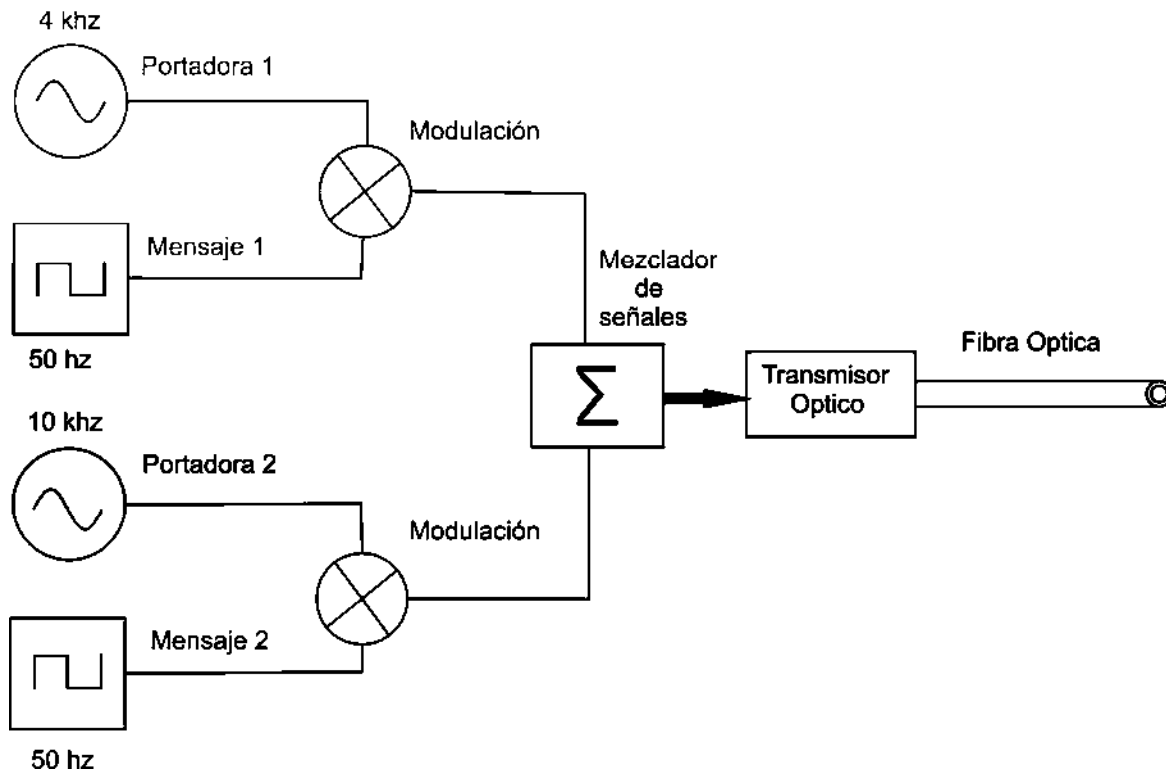


Figura 3.6 Esquema transmisor múltiple

Las frecuencias para la transmisión fueron seleccionadas de la siguiente manera:

- o $f_1 = 4 \text{ kHz}$
- o $f_2 = 10 \text{ kHz}$

Se realizó la selección de esa manera únicamente con el fin de comprobar que el sistema puede transmitir señales en un rango de frecuencia amplio, debido a eso ambas portadoras están considerablemente alejadas una de otra.

3.5 Generación de la señal portadora

Para generar una señal portadora de 1khz, utilizaremos el oscilador Puente de Wein, cabe mencionar que un circuito oscilante es el encargado de producir las oscilaciones deseadas; sin embargo, no es capaz de mantenerlas por sí solo. El oscilador es el conjunto que forman el circuito oscilante, el amplificador y la red de realimentación juntos. En la figura 3.7 se muestra un oscilador Puente de Wein.

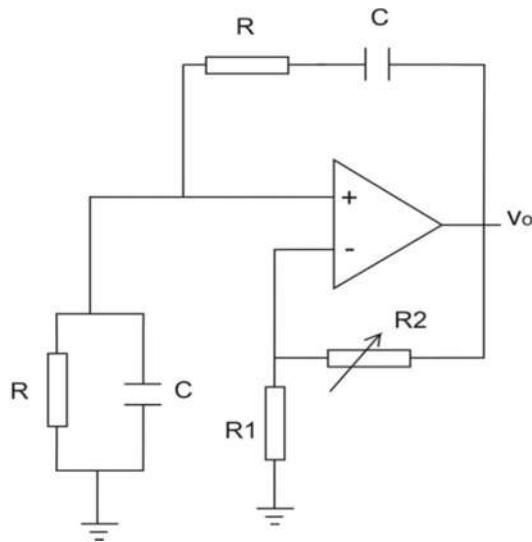


Figura 3.7 Puente de Wein

Donde las ecuaciones de este circuito son las siguientes:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$A_f = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Para alcanzar una frecuencia de 1Khz se selecciona un valor fijo para el capacitor y se calcula R, además para obtener oscilaciones sostenida, la magnitud de la ganancia se debe ajustar $A_f = 3$, por lo tanto los valores de los componentes quedan de la siguiente manera:

$$C = 0.015\mu F$$

Para $f_o = 1 \text{ khz}$:

Despejando.

$$R = \frac{1}{2\pi C f_o}$$

$$R = \frac{1}{2\pi(0.015\mu F)(1000 \text{ hz})} = 10610 \Omega$$

$$R = 10 \text{ k}\Omega$$

$$\frac{R_2}{R_1} = 2$$

$$R_2 = R_1(A_F - 1)$$

$$R_2 = 10\text{k}\Omega(3.1 - 1)$$

$$R_2 = 21 \text{ k}\Omega$$

Para $f_o = 10 \text{ khz}$:

$$C = 0.001 \mu F$$

$$R = \frac{1}{2\pi(0.001\mu F)(10000 \text{ hz})} = 15\text{k}\Omega$$

$$R_2 = 25 \text{ k}\Omega$$

3.6 Mensaje a transmitir

Como se mencionó anteriormente el mensaje a transmitir por medio de la fibra óptica es un mensaje digital, para corroborar que esto es cierto generaremos una señal digital con el propósito de comprobar que la modulación y la transmisión de datos se realiza correctamente, para generar la palabra digital utilizaremos un circuito integrado 555 en su configuración astable el circuito se ilustra en la figura 3.8, Se eligió este circuito ya que este es uno de los circuitos integrados más versátiles y económicos que existen,

además de la gran cantidad de proyectos que se puede utilizar, además con este circuito se consiguen temporizaciones muy estables, el mensaje tendrá una frecuencia aproximada a los 50 Hz.

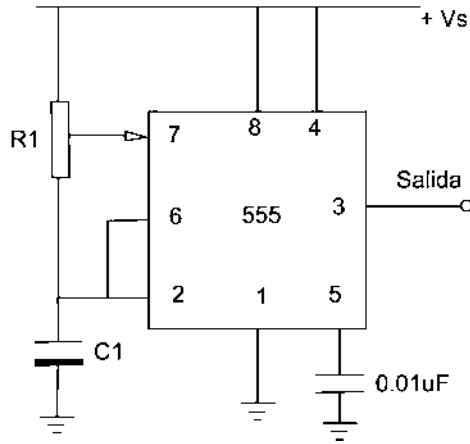


Figura 3.8 Configuración 555 como astable

Como anteriormente se mencionó para obtener la frecuencia deseada para las pruebas de nuestro mensaje, debemos determinar el periodo para el cálculo correspondiente de la frecuencia de acuerdo con esta configuración el periodo se determina por la siguiente ecuación:

$$T = T_m + T_s$$

Donde:

T Periodo

T_m Periodo en alto

T_s Periodo en bajo

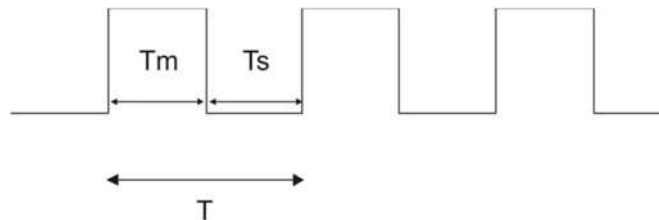


Figura 3.9 Relación de tiempos

La relación T_m y T_s , también conocida como “duty cycle”, y que es muy utilizada a la hora de controlar la velocidad de motores de corriente continua, el brillo de una lámpara, etc. De acuerdo al circuito de la figura 3.8 estos periodos se calculan mediante las ecuaciones siguientes:

$$T_s = 0.7 * \frac{R1}{2} * C1$$

$$T_m = 0.7 * R1 * C1$$

3.7 Modulación de señales

Como se mencionó en los apartados anteriores, para lograr cualquier tipo de modulación se necesitan básicamente dos señales, la señal modulante la cual es el mensaje que deseamos transmitir y la señal portadora la cual nos sirve realizar la modulación para transmitir la información a grandes distancias. En la figura 3.10 se muestra el esquema básico del bloque de modulación.

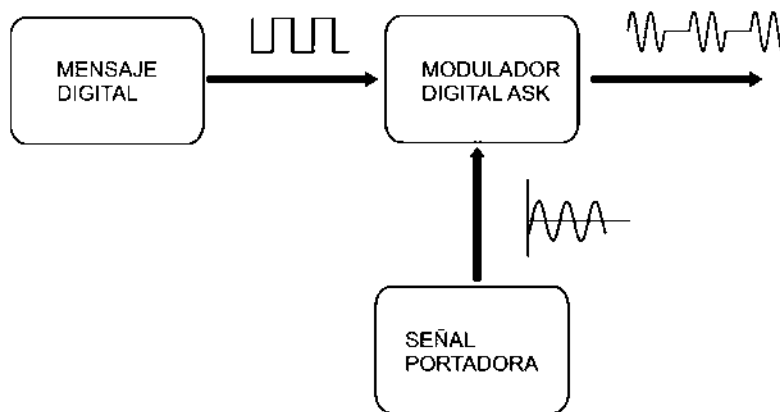


Figura 3.10 Esquema básico del bloque de modulación

Del esquema mostrado en la 3.10 anterior hemos generado nuestro mensaje digital de prueba con nuestro 555, así mismo también hemos generado nuestra señal portadora utilizando el puente de Wein implementado anteriormente. Para conseguir una señal modulada utilizaremos un multiplicador de señales, ya que en esencia una señal de modulación de amplitud tiene esa característica, debido a que deseamos una transmisión clara utilizaremos un multiplicador de precisión conocido como AD534.

3.7.1 Multiplicador de precisión AD534

Las propiedades más importantes de este circuito son las siguientes:

- o Alta calidad para procesar señales analógicas
- o Muy baja atenuación en frecuencias de 10 Hz hasta 10 KHz
- o Estable durante periodos largos en funcionamiento
- o Alta impedancia de entrada
- o Diferentes tipos de empaquetado.

Además de las características antes mencionadas, este circuito ofrece diferentes modos de operación a continuación una breve descripción de los mismos:

- a) **Operación como multiplicador.** La figura 3.11 muestra la conexión básica del circuito AD534 en modo multiplicador.

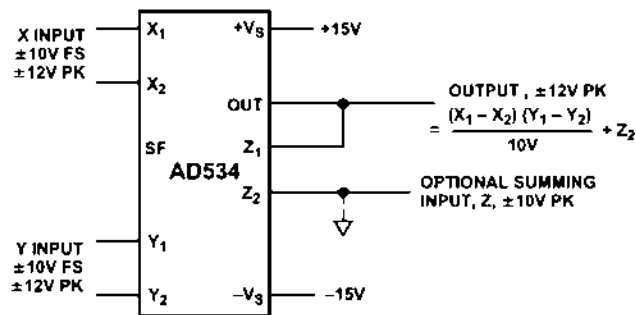


Figura 3.11 Configuración del AD534 como multiplicador

En algunos casos el usuario puede reducir la alimentación de corriente alterna al mínimo aplicando un voltaje pequeño externo de $\pm 30 \text{ mV}$ en las entradas X o Y. Siendo esta la configuración que utilizaremos para la realización de nuestro proyecto de tesis.

- b) **Operación en cuadratura.** Su funcionamiento en cuadratura se obtiene de la misma manera como el modo multiplicador pero las entradas X e Y se utilizan en paralelo
- c) **Operación como divisor.** Esta configuración genera una salida proporcional a la desviación porcentual de una variable A con respecto de una variable de referencia B, con una escala de 1 volt por ciento.

En la figura 3.12, se muestran los diferentes tipos de empaquetados, así como sus correspondientes configuraciones para cada una de sus diferentes presentaciones, para la elaboración de la presente tesis utilizaremos el empaquetado conocido como **TO-100 (H-10A)**

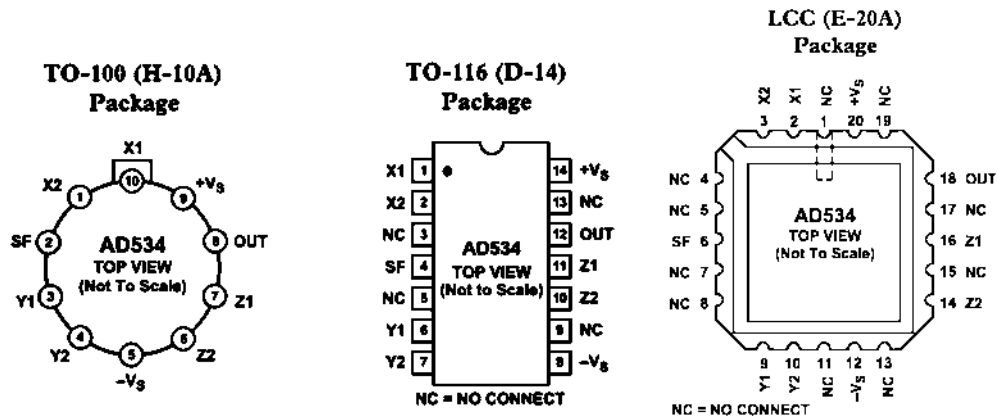


Figura 3.12 Diferentes empaquetados del AD534

3.7.2 Circuito de modulación

Como se mencionó en el apartado del inciso a), para lograr la modulación digital utilizaremos la configuración básica de la figura 3.11 quedando el circuito del bloque de modulación (figura 3.12) de la siguiente manera:

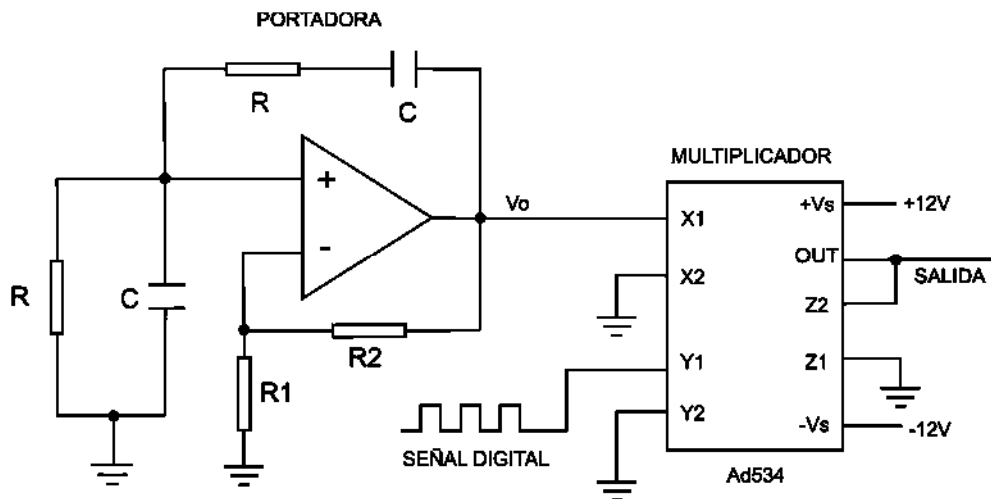


Figura 3.13 Diseño del circuito de modulación.

3.8 Mezclador de señales

Una vez teniendo dos o más señales a transmitir es necesario “mezclar” estas señales para poderlas enviar por un sólo medio de transmisión, una vez mezcladas dichas señales debemos acoplar la señal de acuerdo a los rangos de operación del transmisor óptico HFBR-1402 el cual solo opera en un rango de (0mA a 60mA). Para mezclar las señales implementaremos el circuito sumador inversor, el cual permite mezclar una gran cantidad de señales, aunque no existe un número limitado de señales, la capacidad para mezclar las señales solo puede ser determinado por la capacidad del amplificador operacional que se implemente. La forma básica del sumador inversor es la que se muestra en la figura 3.14.

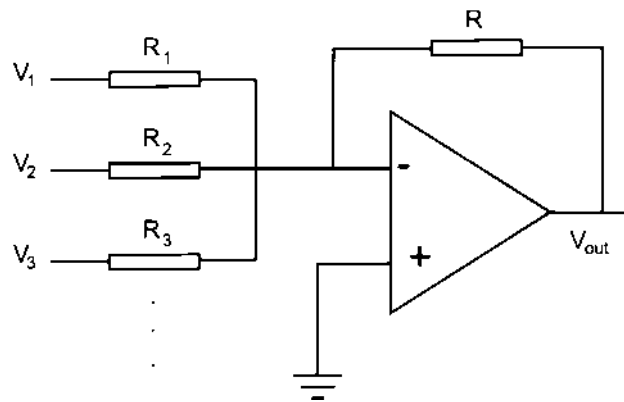


Figura 3.14. Circuito sumador inversor

A simple vista se observa que este circuito no es más que un simple amplificador inversor con dos entradas y por lo tanto con dos resistencias de entrada, lo cual facilita en gran manera su análisis.

La tensión de salida de un amplificador inversor tomando en cuenta el circuito anterior y con una sola entrada es la siguiente:

$$V_{out} = -\left(\frac{V_1}{R_1}\right)R$$

Analizando el circuito para dos entradas, podemos obtener la tensión de salida.

$$\Delta_1 = -\left(\frac{V_1}{R_1}\right)R; \quad \Delta_2 = -\left(\frac{V_2}{R_2}\right)R;$$

$$\Delta_t = \Delta_1 + \Delta_2$$

$$V_{out} = -\left(\frac{V_1}{R_1}\right)R - \left(\frac{V_2}{R_2}\right)R$$

$$V_{out} = -R\left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2}\right)$$

$$\text{Si } R = R_1 = R_2$$

$$V_{out} = -(V_1 + V_2)$$

Conectando un amplificador inversor de ganancia unitaria a la salida del sumador inversor, se obtiene un amplificador sumador no inversor, es importante señalar que se no se utilizo un amplificador sumador no inversor desde un principio, debido a que la salida de este circuito se encuentra en fase con la entrada, pero no se puede obtener ganancia unitaria, esto equivale a que los valores de la portadora varíen entre -5v a +5v, lo cual podría afectar el correcto funcionamiento del convertidor de voltaje a corriente y por lo tanto disminuir o aumentar la potencia del trasmisor óptico HFBR-1402. En la figura 3.14 se presenta el circuito mezclador de señales completo, cabe mencionar que de acuerdo al análisis anterior se tomo el mismo valor para todas las resistencias siendo este igual a 1 K Ω , esto con el objetivo de obtener ganancia unitaria y no afectar los parámetros deseados.

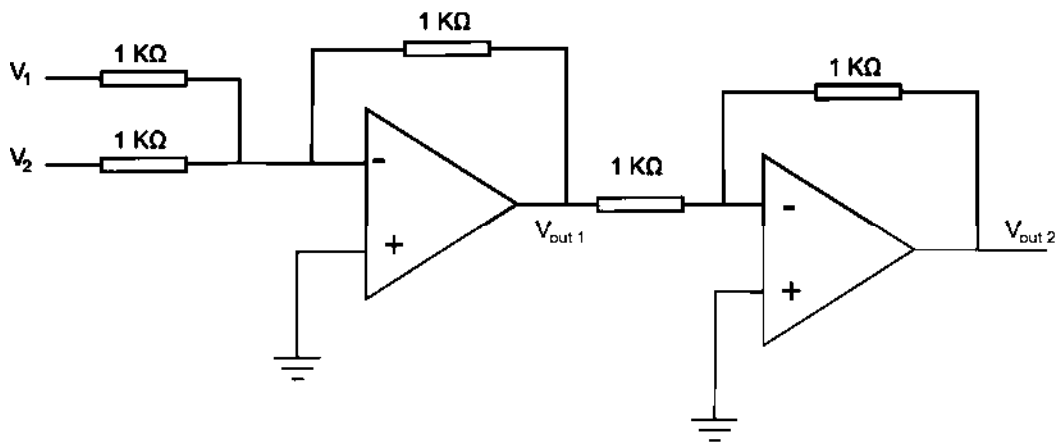


Figura 3.15. Circuito sumador de señales

La tensión de salida de este circuito se puede determinar de acuerdo a la ecuación obtenida del análisis del circuito anterior agregando únicamente el circuito inversor, quedando de la siguiente manera.

$$V_{out2} = R \left(\frac{V_1}{R} + \frac{V_2}{R} + \frac{V_{out1}}{R} \right)$$

Recordando que $R = R_1 = R_2$.

$$V_{out2} = V_1 + V_2 + V_{out1}$$

3.9 Acondicionamiento de la señal

Como se mencionó anteriormente el transmisor óptico sólo opera en un rango específico (0mA a 60mA). Dado que la señal portadora es una señal puramente senoidal, esta se compone de un semi-ciclo positivo y semi-ciclo negativo, el transmisor óptico no opera con voltajes negativos por lo tanto es necesario ajustar el rango de voltajes de la señal portadora a valores considerados como positivos, el voltaje de la señal portadora es de -5v a +5v, para poder operar el transmisor adecuadamente convertiremos el voltaje de salida de 0v a 5v, esto se logra con el circuito de la figura 3.16. Posteriormente implementaremos un circuito convertidor de voltaje a corriente para finalmente ajustar el rango para su correcto funcionamiento.

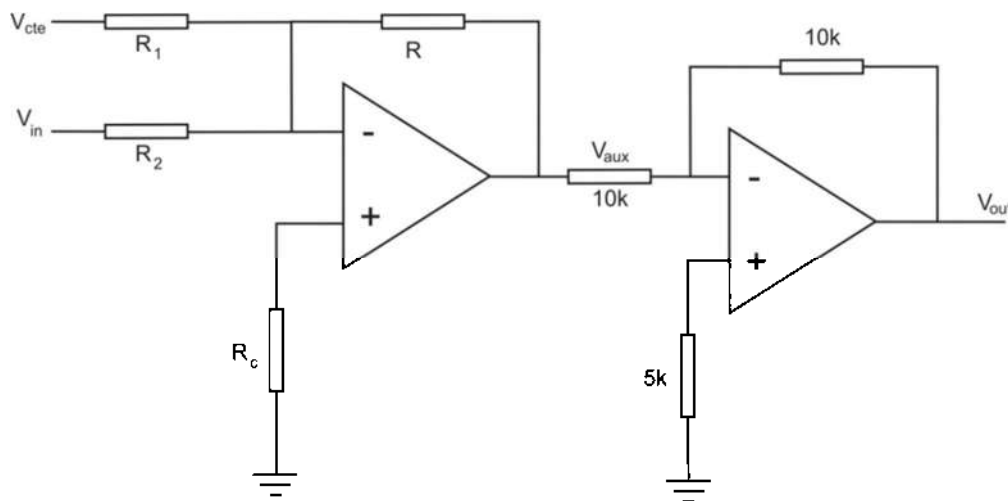


Figura 3.16 Circuito ajuste rango del transmisor

Al igual que el circuito sumador no inversor tratado con anterioridad la señal de salida es la siguiente:

$$V_{aux} = -\left(\frac{V_i}{R_2}\right)R - \left(\frac{V_{cte}}{R_1}\right)R$$

Como el segundo amplificador operacional tiene la configuración básica de un amplificador inversor podemos deducir que la ecuación del circuito responde de la siguiente manera:

$$V_{out} = R\left(\frac{V_{cte}}{R_1} + \frac{V_i}{R_2}\right)$$

En el caso de V_{cte} induciremos un voltaje constante en el circuito, para evitar variaciones en la ganancia del circuito lo dejaremos como ganancia unitaria, si hay que realizar un ajuste será directamente variando V_{cte} . La señal de salida obtiene la siguiente forma:

$$R_1 = R = 10k\Omega$$

$$V_{out} = \left(\frac{R_1}{R_2}V_i + V_{cte}\right)$$

Recordando la ecuación general de la línea recta $y = mx + b$, donde m es la pendiente y b es la intersección con el eje y . A simple vista podemos observar que nuestra señal de salida responde a la ecuación de una recta.

$$y = V_{out}; \quad mx = \frac{R_1}{R_2}V_i; \quad V_{cte} = b;$$

De acuerdo a las necesidades de nuestro circuito de conversión de nuestro circuito, de -5v a +5v a una salida de 0v a 5v. Podemos determinar la pendiente.

$$\text{Para } V_i = -5V, \quad V_{out} = 0V$$

$$0 = -5m + b$$

$$\text{Para } V_i = 5V, \quad V_{out} = 5V$$

$$5 = 5m + b$$

De lo cual obtenemos la siguiente matriz.

$$\left[\begin{array}{cc|c} 5 & 1 & 5 \\ -5 & 1 & 0 \end{array} \right]$$

$$m = 0.5$$

$$b = 2.5$$

Por lo tanto la ecuación de nuestro circuito toma la siguiente forma:

$$V_{out} = 0.25V_i + 2.5$$

Donde

$$V_{cte} = 2.5V$$

Para obtener el valor de R_c , esta se calcula por medio del paralelo de las resistencias R_1 y R , obteniendo el siguiente valor.

$$R_c = 6.6 \text{ k}\Omega$$

Por último, procedemos a calcular el valor de R_2

$$V_{out} = \left(\frac{10\text{k}\Omega}{R_2} V_i + 2.5 \right)$$

$$R_2 = \left(\frac{10\text{k}\Omega * V_i}{V_{out} - 2.5} \right)$$

Cabe mencionar que en el tanto el valor V_i y V_{out} , son valores que constantemente están variando en el tiempo, mientras el voltaje de entrada cambie el voltaje de salida será afectado de la misma forma, el valor que el voltaje de entrada puede tomar está determinado por el rango de 0V a 5V, como se mencionó anteriormente. Para calcular el valor de la resistencia R_2 se tomaron distintas muestras las cuales se encuentran en el rango mencionado, en la tabla presentada a continuación se detallan los valores de la resistencia.

A partir de la ecuación:

$$R_2 = \left(\frac{10\text{k}\Omega * V_i}{V_{out} - 2.5} \right)$$

Se obtuvieron los siguientes valores.

Vin	Vout	RESISTENCIA
-5	0	20k
-4.5	0.25	20k
-4	0.5	20k
-3.5	0.75	20k
-3	1	20k
-2.5	1.25	20k
-2	1.5	20k
-1.5	1.75	20k
-1	2	20k
-0.5	2.25	20k
0.5	2.75	20k
1	3	20k
1.5	3.25	20k
2	3.5	20k
2.5	3.75	20k
3	4	20k
3.5	4.25	20k
4	4.5	20k
4.5	4.75	20k
5	5	20k

Figura 3.17 Tabla cálculo del valor de la resistencia R_2

Como se aprecia el valor de la resistencia en cualquier valor que pueda tomar V_i , dentro del rango establecido esta siempre será de 20kΩ.

3.10 Convertidor de voltaje a corriente

Recordando el capítulo anterior un transmisor de fibra óptica consiste en una interconexión ya sea a analógica o digital, un convertidor de voltaje a corriente, una fuente luminosa y un acoplado de luz de fuente a fibra. En un transmisor de fibra óptica, la fuente luminosa puede modular señales analógicas o digitales, en la modulación digital, la fuente original puede tener ya la forma digital o bien si esta en forma analógica, debe convertirse a una corriente de pulsos digitales.

El convertidor de voltaje a corriente sirve como interfaz eléctrica entre los circuitos de entrada y la fuente luminosa, esta fuente puede ser un LED o un diodo de emisión laser (ILD), la cantidad de luz emitida por estas fuentes es proporcional a la cantidad de corriente de excitación. Por este motivo es tan importante el uso del convertidor de voltaje a corriente, ya que el voltaje de la señal de entrada convertida a corriente es necesario para activar la fuente luminosa. El convertidor de voltaje a corriente que emplearemos se muestra en la figura 3.18.

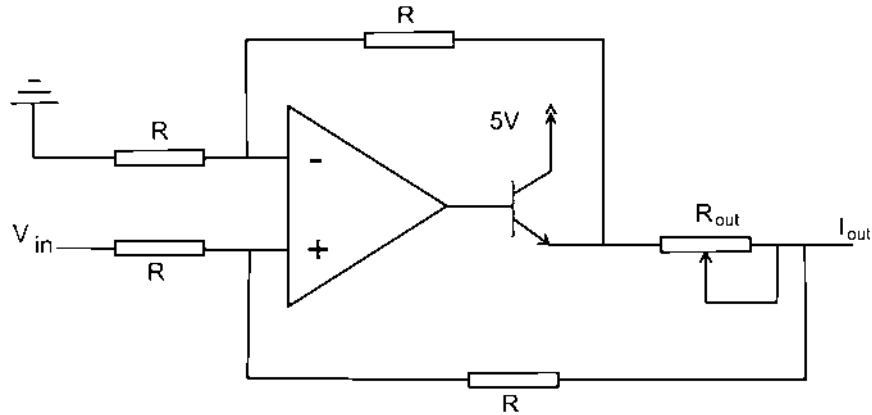


Figura 3.18 Convertidor de voltaje a corriente.

La corriente a través de R_{out} para este circuito es la siguiente:

$$I_{out} = \frac{V_{out}}{R_{out}} \approx \frac{V_{in} - 0V}{R_{out}}$$

Reduciendo la ecuación tenemos que.

$$I_{out} = \frac{V_{in}}{R_{out}}$$

Tomando en cuenta que el valor máximo de entrada es de 5V, y 60mA como valor máximo a la salida del convertidor, podemos calcular el valor de la resistencia R_{out} .

$$R_{out} = \frac{5V}{60mA} = 83.3\Omega$$

3.11 Transmisor óptico

En la comunicaciones a través de fibra ópticas los transmisores y receptores ópticos son los encargados de tomar la señal eléctrica en forma de voltaje o corriente y convertirla en una señal luminosa con el objetivo de transportar dicha señal a través de la fibra óptica.

La capacidad y complejidad del transmisor y receptor depende del tipo de señal que se quiere enviar, si esta es analógica o digital, el tipo de codificación y de la clase de fuente luminosa que se va a modular

El transmisor óptico seleccionado para la elaboración del proyecto de tesis es el HFBR-1402, un dispositivo utilizado comúnmente para enlaces de sistemas de información, aplicaciones industriales, redes locales, módems y multiplexores, enlaces de video entre otros, las características del transmisor son las siguientes:

- Transmisor y receptor de bajo costo.
- Distancia de enlace arriba de 2.7km.
- Soporta distintos tamaños de fibras; 20/125 μ m, 62.5/125 μ m, 100/140 μ m, y 200 μ m.
- Temperatura de operación -40°C a 85°C.
- Rango de operación 0mA a 60mA.



Figura 3.19. Transmisor óptico HFBR-1402.

Este transmisor ofrece una potencia óptica de -12dBm, en su rango de operación nominal a 60mA, para cables de fibras ópticas de dimensiones de 100/140 μ m, Lo cual lo hace ideal para grandes distancias sin pérdida significativa de la señal. La configuración del transmisor HFBR-1402, se muestra en la figura 3.20. Básicamente, el transmisor

óptico es un diodo LED, por lo tanto la salida de nuestra señal ya mezclada y ajustada en rango se conectará directamente a al ánodo del transmisor.

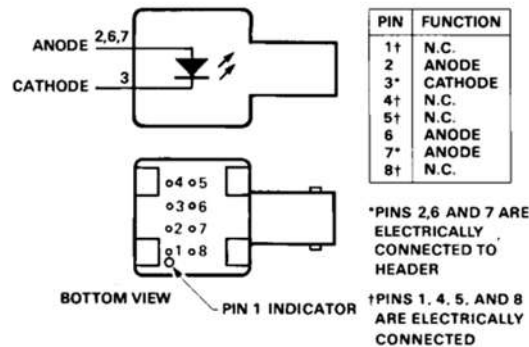


Figura 3.20 Configuración del transmisor HFBR-1402

3.12 Cable de fibra óptica

El cable utilizado en el proyecto debe ser tener un conector tipo SMA, ya que el transmisor que utilizamos tiene esta salida, el cable seleccionado tiene un diámetro de 100/140 μm , con un longitud no mayor a los 5 metros. Las características de este tipo de fibra se muestran a continuación.

- Diámetro del núcleo: 100 μm .
- Diámetro del revestimiento: 140 μm .
- Diámetro de capa primaria: 900 μm .
- Diámetro del cable exterior: 2.9mm.

3.13 Sistema completo de transmisión

Hasta este punto hemos terminado nuestro sistema de transmisión múltiple, los circuitos que conforman nuestro proyecto han sido presentados por etapas, para darnos una idea más general de cómo resulta nuestro sistema, en la figura 3.21 se muestran todos los circuitos que conforman nuestro sistema, más adelante trataremos el sistema de recepción múltiple.

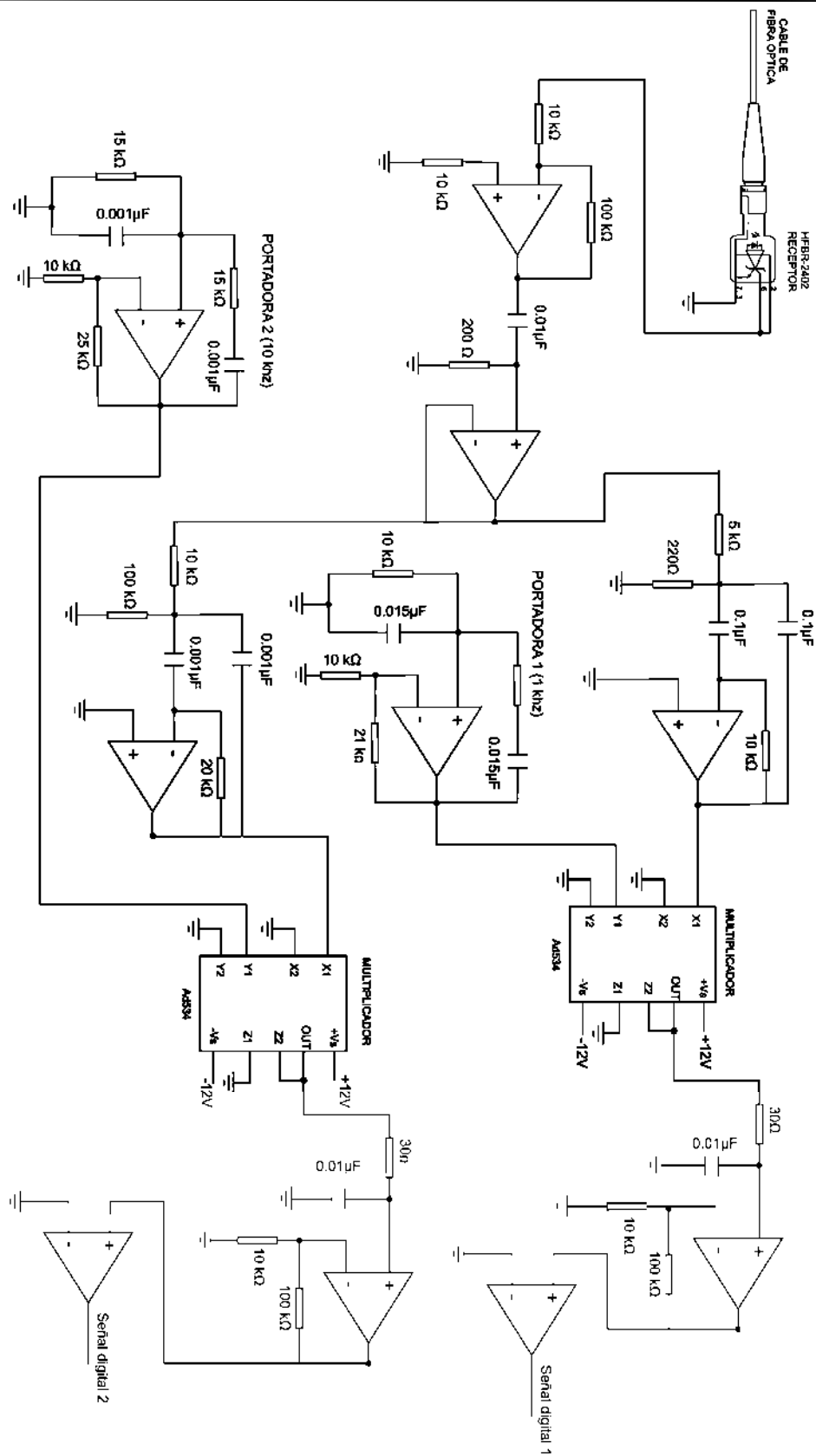


Figura 3.21 Sistema completo de transmisión.

3.14 Receptor óptico

El receptor óptico es un dispositivo encargado de transformar las señales luminosas en señales eléctricas. En un sistema de transmisión analógica el receptor debe amplificar la señal de salida y después demodularla para obtener la información. En cambio en un sistema de transmisión digital, el receptor debe producir una secuencia de pulsos que contienen la información del mensaje transmitido.

Detector óptico

Los detectores ópticos o foto-detectores son diodos semiconductores que operan polarizados inversamente. Durante la absorción de la luz, cuando un foto-detector es iluminado, las partículas de energía luminosa, también llamadas fotones, son absorbidas generando pares electrón – hueco, que en presencia de un campo eléctrico producen una corriente eléctrica.

Las características principales que debe tener son:

- Sensibilidad alta a la longitud de onda de operación
- Contribución mínima al ruido total del receptor
- Ancho de banda grande.

El detector óptico que utilizaremos es el HFBR-2404, el cual se muestra en la figura 3.22 esté transmisor está diseñado para operar en conjunto con el transmisor HFBR-1402.



Figura 3.22 Detector óptico HFBR-2402.

Algunas características de este tipo de detector son las siguientes:

- Opera con el transmisor HFBR-1402
- Diseñado para transmitir señales con fibra óptica de; 50/125μm, 62.5/125μm, 100/140μm y 200μm.
- Contiene un fotodetector y un preamplificador
- Incluye un transistor de colector abierto schottky en la salida.

En la figura 3.23 se da la configuración del receptor HFBR-2402

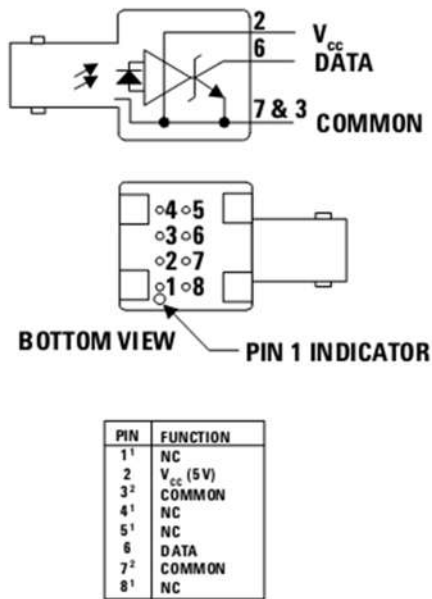


Figura 3.23 Configuración del detector óptico HFBR-2402

3.15 Diseño del receptor múltiple

La señal obtenida contiene una componente de corriente directa por lo tanto necesitamos implementar un filtro pasa altas para eliminar dicha componente pero antes de implementar el circuito amplificaremos la señal al menos unas 50 veces, debido a que la señal obtenida es muy débil, en la figura siguiente se muestra el filtro pasa altas.

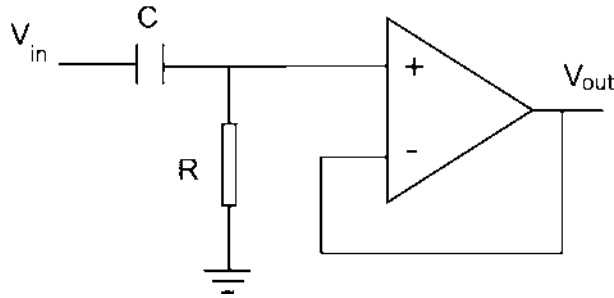


Figura 3.24 Filtro pasa altas.

En el circuito anterior la frecuencia de corte está determinada por la siguiente ecuación:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Donde la frecuencia de corte no será mayor a 30 Hz ($f_c = 30\text{Hz}$), por lo tanto y de acuerdo a la ecuación anterior se fija el valor del capacitor en, $C = 0.1 \mu\text{F}$.

Despejando la ecuación anterior.

$$R = \frac{1}{2\pi C f_c}$$

Sustituyendo valores:

$$R = \frac{1}{2\pi(0.1 \mu\text{F})(30\text{Hz})} = 53051.6 \approx 53\text{k}\Omega$$

3.16 Filtro Pasa-banda angosta

Una parte importante del circuito receptor múltiple consiste en separar las señales obtenidas en el receptor de fibra óptica, para posteriormente eliminar la señal portadora de ambas señales y así obtener la señal digital deseada, para lograr esto se utilizó un filtro pasa-banda angosta el cual tiene la característica de permitir el paso de una banda de frecuencias, y rechaza aquellas frecuencias superiores o inferiores la frecuencia de

central f_c , la respuesta a la frecuencia de un filtro pasa banda angosta se muestra en la figura 3.25.

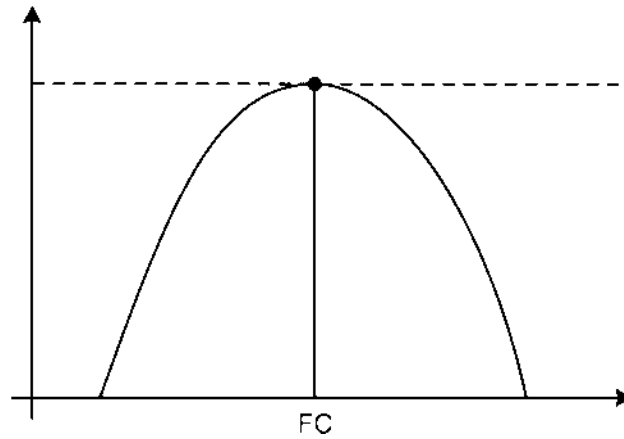


Figura 3.25 Respuesta de frecuencia del filtro pasa banda angosta.

Para la implementación del circuito de banda angosta, se utiliza un solo amplificador con la configuración mostrada en la figura 3.25. Donde la resistencia R define la resistencia de entrada del filtro y donde la resistencia de retroalimentación como se muestra en la figura 3.25 tiene el doble del valor de R , con lo cual obtendremos una ganancia máxima de 1, mientras que R_f permite ajustar o modificar la frecuencia resonante sin cambiar el ancho de banda o la ganancia.

Un elemento principal en los filtros pasa banda es el Factor de Calidad (Q), donde es el cociente de la frecuencia central entre el ancho de banda, siendo un indicador de que tan selectivo sea nuestro pasa banda, mientras sea más alto el valor de Q más angosto será el ancho de banda y mejor la efectividad del filtro.

$$Q = \frac{f_o}{BW}$$

Donde:

Q = Ancho de banda

f_c = Frecuencia central

BW = Ancho de banda

Las ecuaciones que determinan la frecuencia central de nuestro filtro se presentan a continuación así mismo para los cálculos teóricos de las resistencias R y R_f del filtro pasa-banda angosta.

$$BW = f_{c1} - f_{c2}$$

$$R = \frac{Q}{2\pi f_c C A_v}$$

$$R_f = \frac{Q}{2\pi f_c C (2Q^2 - A_v)}$$

Respetando siempre que el factor de calidad sea:

$$Q > \sqrt{\frac{A_v}{2}}$$

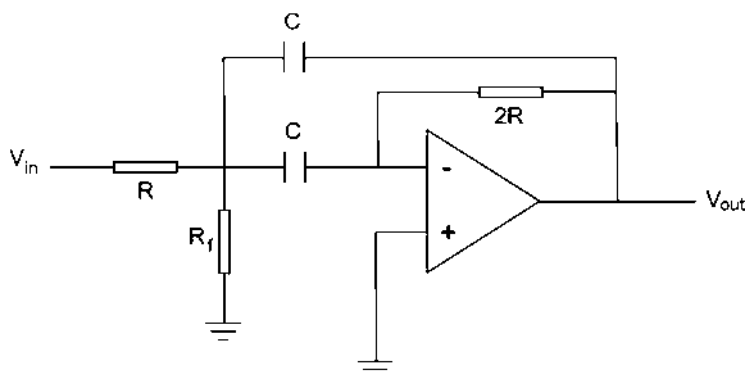


Figura 3.26 Diseño del filtro pasa banda angosta.

La frecuencia de las portadoras es de 1 KHz y 10 KHz, respectivamente. De acuerdo a lo anterior podemos calcular los valores de las resistencias para ambas frecuencias de corte.

Para $f_c = 1066 \text{ hz}$:

Fijando el capacitor con un valor de $C = 0.1 \mu F$ determinamos primeramente el ancho de banda de nuestro filtro.

$$BW = f_{c1} - f_{c2}$$

$$BW = 1.25 \text{ Khz} - 900 \text{ hz} = .35$$

De debe cumplir la condición de Q

$$Q = \frac{f_c}{BW} = \frac{1.066}{0.35} = 3.04$$

$$Q > \sqrt{\frac{Av}{2}}; Q > 0.707$$

Calculando R .

$$R = \frac{Q}{2\pi f_c C A v} = \frac{3.04}{2\pi(1066 \text{ hz})(0.1 \mu F)(1)}$$

$$R = 4538.75 \Omega \approx 5 \text{ k}\Omega$$

Calculando R_f .

$$R_f = \frac{Q}{2\pi f_c C (2Q^2 - Av)} = \frac{3.4}{2\pi(1066 \text{ hz})(0.1 \mu F)(2(3.4^2) - 1)}$$

$$R_f = 229 \approx 220 \Omega$$

Para $f_c = 10 \text{ khz}$:

$$C = 0.001 \mu F.$$

$$R = 10 \text{ k}\Omega.$$

$$R_f = 100 \text{ k}\Omega.$$

3.17 Demodulación de una señal.

La modulación ASK no es más que un caso particular de la modulación AM. Los demoduladores de AM son también válidos para la detección de señales ASK. De esta manera, existen dos métodos comunes para la demodulación ASK: detección síncrona y detección de envolvente.

El método utilizado en el proyecto es la **Detección Síncrona**, la cual consiste en multiplicar analógicamente la señal ASK que llega al demodulador, por la señal portadora que se genera localmente en el receptor. A continuación la señal multiplicada resultante se hace pasar por un filtro pasa bajas con frecuencia de corte menor a 2 veces la frecuencia de la portadora, tal como se ilustra en la figura 3.27.

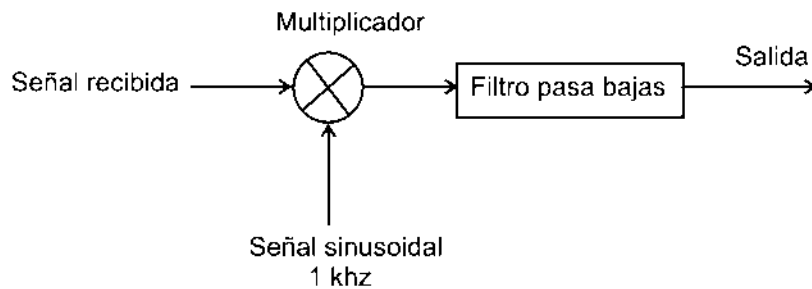


Figura 3.27 Demodulación detección síncrona.

Para lograr esto utilizaremos el multiplexor AD534 utilizado para modular la señal anteriormente, multiplicando la señal recibida por una señal sinusoidal de la frecuencia igual ala de la portadora que se utilizo para transmitir la señal original. La configuración del circuito se muestra en la figura 3.28.

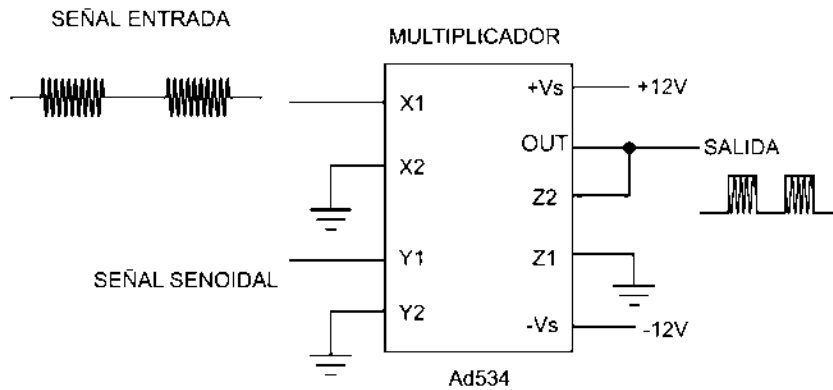


Figura 3.28 Demodulación de la señal original.

Recordando que las señales fueron transmitidas con una frecuencia de 1 kHz y 10 kHz, de la misma manera la señal sinusoidal, que entra en el circuito mostrado anteriormente tiene las mismas frecuencias respectivamente. Realizado este paso esperaríamos obtener nuestra señal original sin embargo esta señal obtenida aunque tiene la misma forma de nuestra señal original, la misma todavía contiene componentes de la señal portadora, en la imagen de la figura 3.29 se muestra un comparativo entre la señal original y la señal obtenida en el proceso de demodulación.

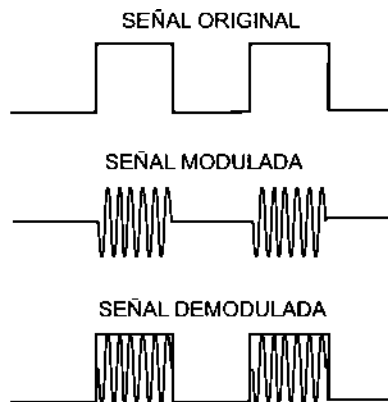


Figura 3.29 Comparativo de señales obtenidas.

3.18 Filtrado del mensaje

Hasta el momento hemos podido recuperar el mensaje digital casi en su totalidad, la etapa que continua consiste en eliminar todo rastro de la sinusoidal que contiene la señal obtenida, esto se logra mediante un filtro que elimine del mensaje toda componente mayor a la de la frecuencia del mensaje el cual no sobrepasa los 100 Hz, en cualquiera de

los dos mensajes a transmitir. El circuito utilizado es un filtro activo pasa bajas, que se muestra en la figura 3.30.

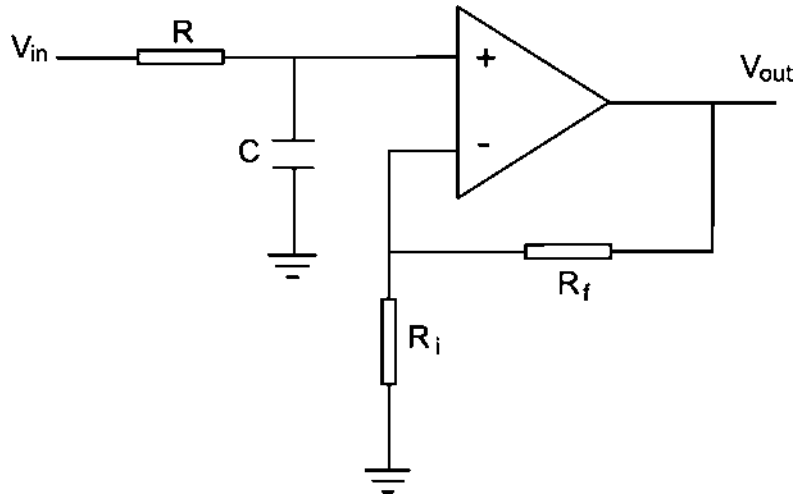


Figura 3.30 Filtro pasa bajas.

Un filtro pasa bajas permite el paso de una banda específica de frecuencias, en este caso en particular esta frecuencia va desde la componente de CD, hasta una frecuencia f_c , la ecuación que determina la frecuencia de corte es la siguiente:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Seleccionando valor de $C = 0.01 \mu F$ y $f_c = 100 \text{ Hz}$.

$$R = \frac{1}{2\pi(0.01 \mu F)(100 \text{ Hz})}$$

$$R = 31.0 \Omega$$

3.19 Reconstrucción del mensaje original

Hasta este punto el mensaje se ha podido recuperar en su totalidad sin embargo la señal recupera ha sido afectada por los diversos factores a los que las señales fueron sometidas por lo tanto para tener una señal digital mejor definida agregaremos como último proceso un amplificador operacional en la configuración de comparador está

configuración se presenta en la imagen 3.31, este circuito es comúnmente utilizado para transformar una señal senoidal a una señal cuadrada, en nuestro caso la señal obtenida no es senoidal sin embargo no está bien definida, con este proceso obtendremos una señal más simétrica y parecida a un mensaje digital.

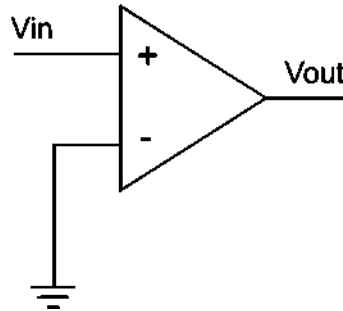


Figura 3.31. Circuito comparador.

Observe que la configuración de este circuito es muy simple, sin embargo es una herramienta muy útil para nuestros propósitos en esta configuración el circuito obtiene la tensión en la entrada (+), y le resta la tensión de salida y el resultante lo multiplica por un número elevado para que este salga en forma de tensión a la salida, este número elevado es el voltaje de saturación, 10v aproximadamente dependiendo del amplificador y del voltaje de alimentación del circuito.

Como la señal de entrada no contiene voltajes negativos, cuando el voltaje sea mayor a 0v, el voltaje de salida será el voltaje de saturación, pero el voltaje de alimentación será de 5v, entonces cuando el voltaje de entrada sea mayor que 0, el voltaje de salida será 5V y cuando el voltaje de entrada sea igual a 0, el voltaje de salida será cercano a 0V de esta manera obtendremos una señal digital mas simétrica y así podremos reconstruir nuestros mensaje originales.

3.20 Sistema completo del receptor

Finalmente, se recuperaron los mensajes con éxito en ambos casos, por lo tanto hemos concluido con el diseño del circuito receptor y con esto dar fin a esta etapa de diseño, los circuitos que conformaron el sistema de recepción múltiple se muestran en la figura 3.32.

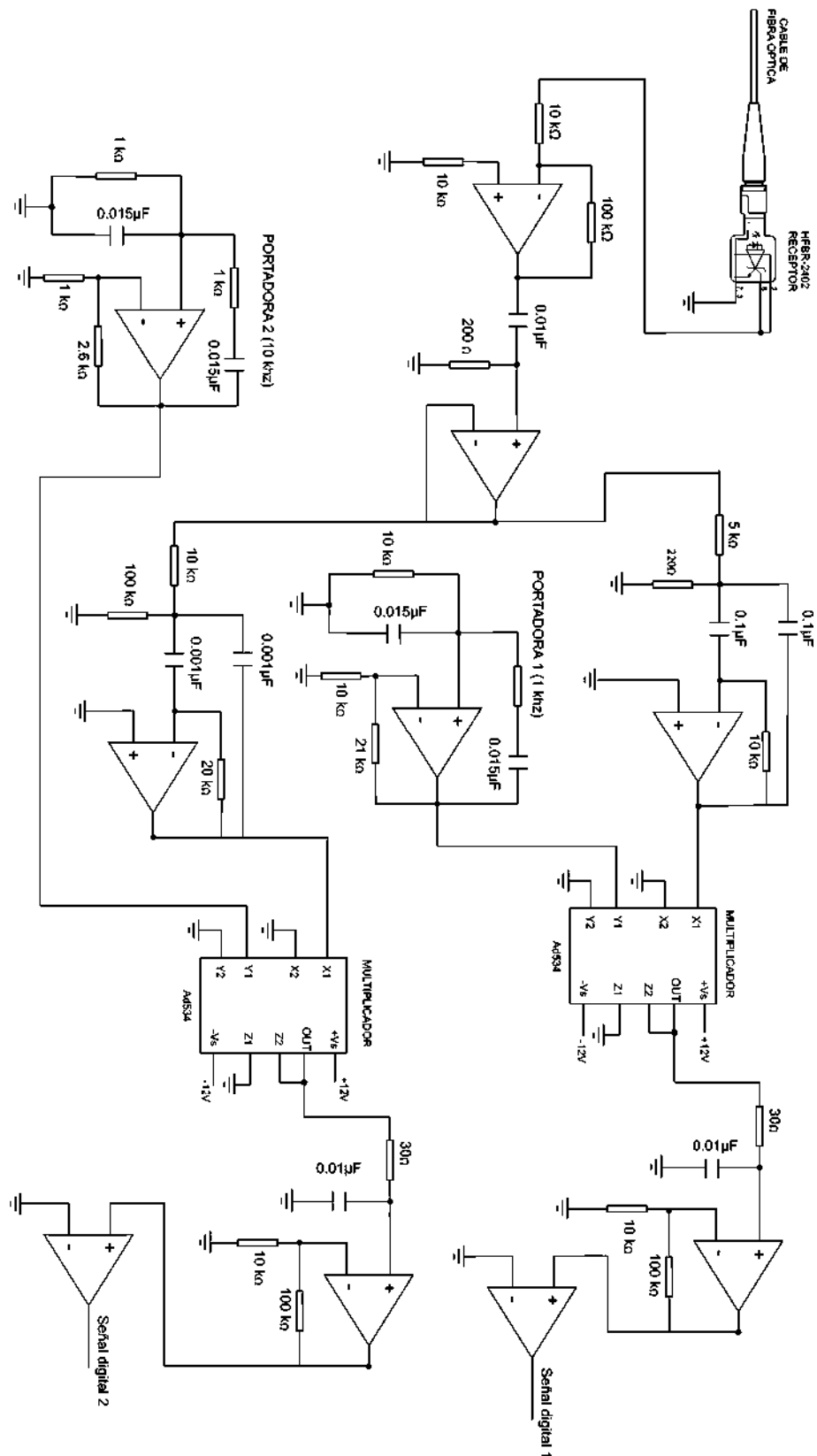


Figura 3.32 Sistema completo de recepción.

Capítulo 4

IMPLEMENTACION Y SIMULACIONES DEL SISTEMA

4.1 Introducción

En este capítulo se presentan las pruebas y conclusiones de nuestro sistema, los resultados de cada bloque se presentarán así como las respectivas simulaciones para su comparación, cabe recordar que las simulaciones fueron hechas en el simulador PROTEUS, todas las etapas fueron tratadas de esta forma a excepción de los circuitos transmisores y receptores debido a que el programa no maneja con dichos componentes ni circuitos similares, el orden presentado será el mismo que se trató en el capítulo anterior.

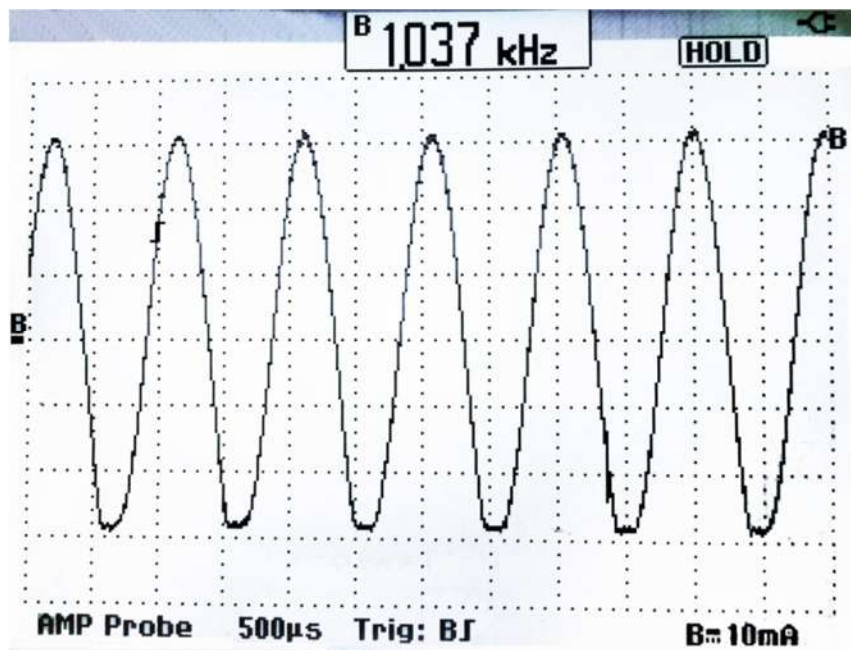
4.2 Sistema de transmisión múltiple

Para comenzar con este capítulo expondremos como primer término el sistema de transmisión múltiple, siguiendo el orden del capítulo anterior presentando lo resultados obtenidos, así como las comparaciones correspondientes con los datos obtenidos en las simulaciones.

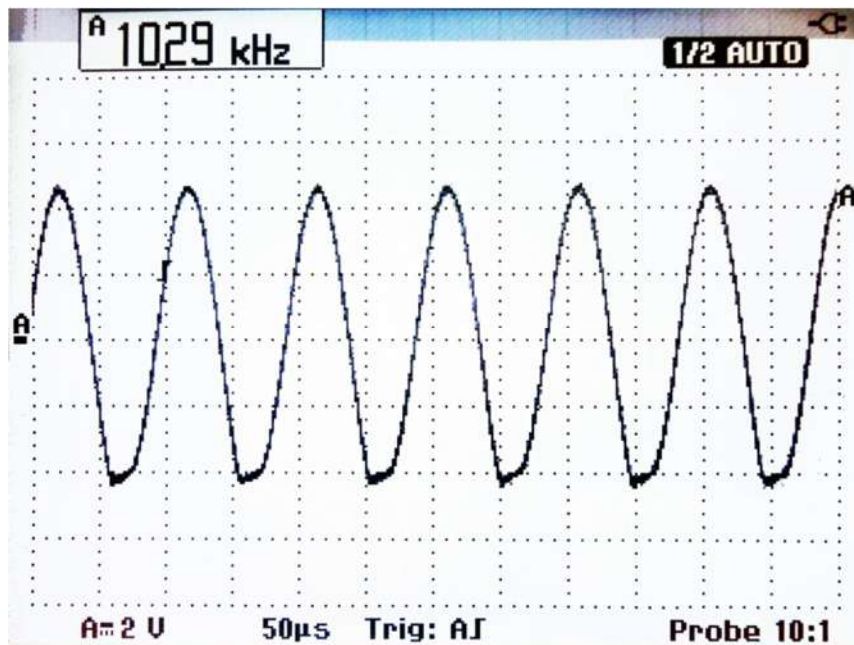
4.2.1 Generación de la señal portadora

En la figura 4.1 se muestra el resultado obtenido mediante el método puente de Wein en el osciloscopio de la señal portadora a 1 kHz y 10 kHz, los resultados obtenidos

en el simulador así como el circuito armado físicamente demuestran el correcto funcionamiento del oscilador en cuestión.



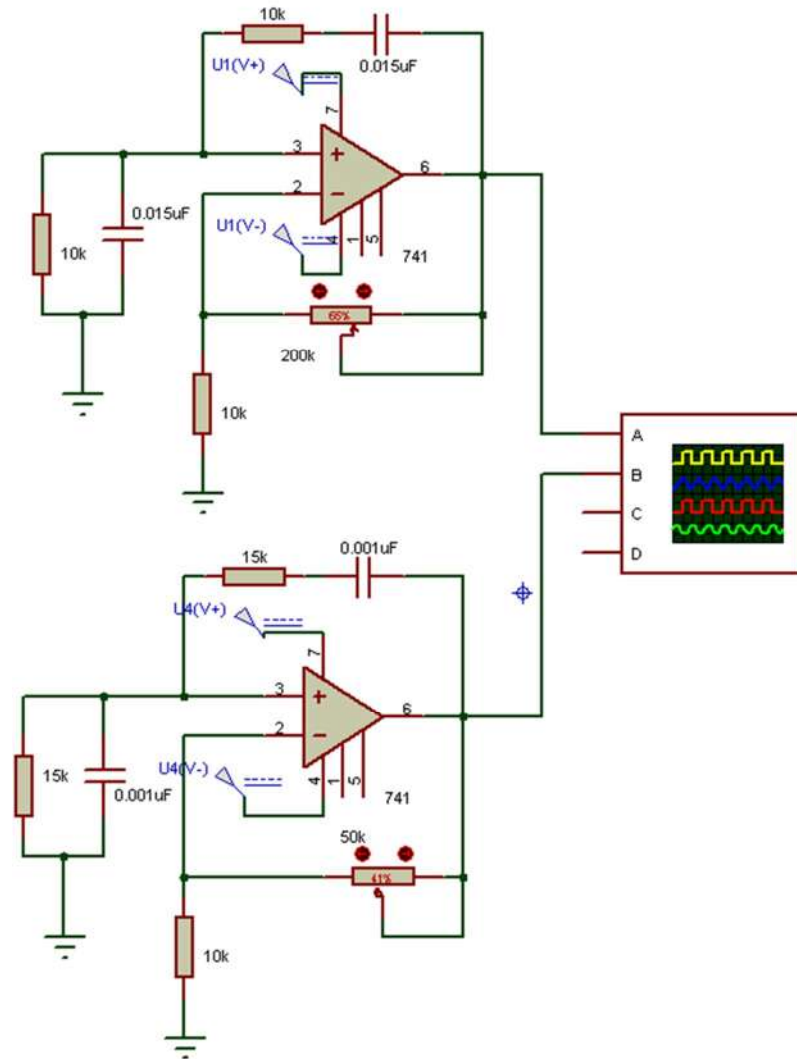
(a)



(b)

Figura 4.1 Resultado en Osciloscopio. (a) Portadora 1khz (b) Portadora 10 kHz

En la figura 4.2 se muestra el circuito simulado en PROTEUS, el cual ayudará a comprobar el funcionamiento de los circuitos, que generan las señales portadoras de 1 kHz y 10 kHz.



(a)

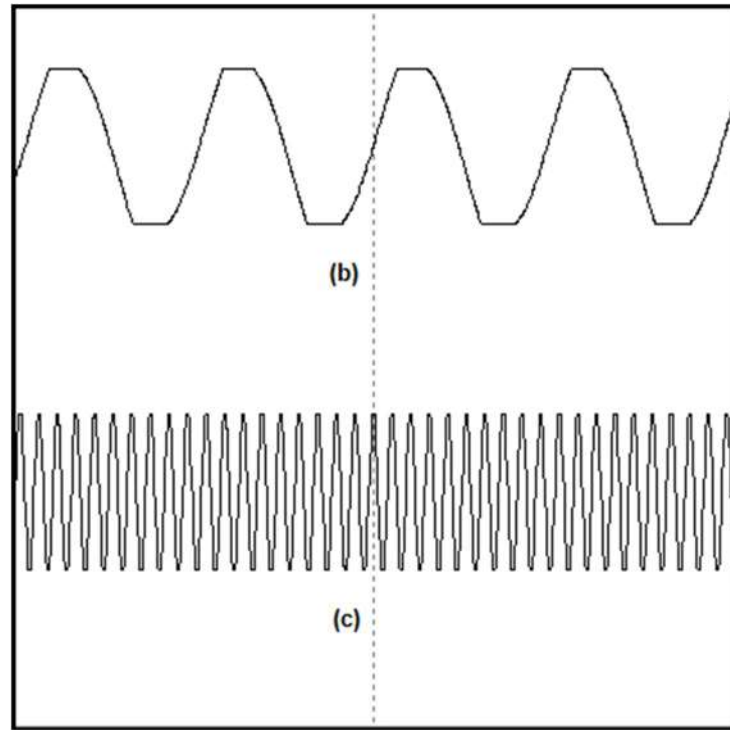


Figura 4.2 Oscilador en Proteus; (a) Circuito puente de Wein; (b) Portadora 1 kHz; (c) Portadora de 10 kHz.

El periodo obtenido en el simulador es de $980 \mu S$, para comprobar que la frecuencia es la deseada mediante la ecuación siguiente comprobaremos dichos resultados.

$$f = \frac{1}{T}$$

$$f = \frac{1}{(980 \mu S)} = 1020.4 \text{ hz}$$

Por lo tanto, la portadora 1 es correcta. En conclusión el circuito oscilador puente de Wein satisface los requerimientos necesarios para generar ambas señales portadoras.

4.2.2 Modulación Ask

Para presentar los resultados de esta etapa hay que recordar que se debe tener un mensaje digital a transmitir, en el capítulo anterior presentamos la configuración de un 555 como astable el cual nos genera un mensaje digital con una frecuencia aproximada a los 100hz

El resultado de la configuración astable del 555 se muestra en la figura 4.3, se muestra el mensaje digital que vamos a enviar con una frecuencia cercana a los 50 Hz que habíamos propuesto inicialmente.

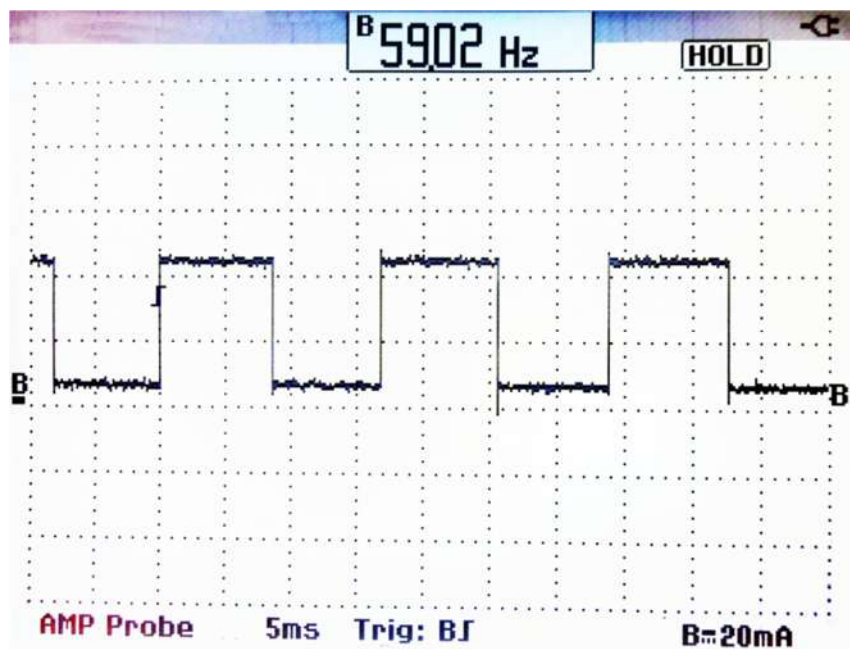


Figura 4.3 Mensaje a transmitir

A continuación se muestran los resultados obtenidos en el osciloscopio donde se aprecian las señales moduladas con frecuencias de 1 kHz y 10 khz, respectivamente. La señal digital a transmitir contiene la misma frecuencia para ambos casos.

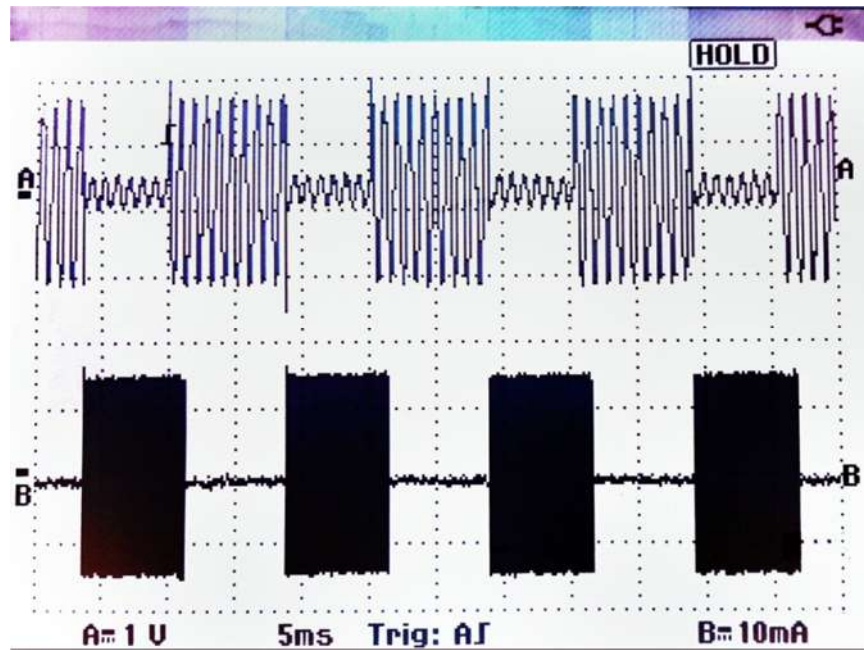


Figura 4.4 Señales moduladas. Arriba señal modulada 1 kHz. Abajo señal modulada 10 KHz

En la figura 4.4 se aprecian las mismas características en ambas señales con la única diferencia que la señal modulada a 10 kHz, no se observa la señal senoidal con la misma claridad que cuando se modula a 1 kHz, esto se debe a la diferencia de velocidades de la portadora, sin embargo, la transmisión en ambas señales es correcta, más adelante se presentan los resultados mediante simulación, los cuales como esperaríamos deben de ser muy similares en comparación con los obtenidos mediante el osciloscopio, de ser así esto nos demostraría que hasta este punto los diseños implementados son correctos.

Anteriormente, se mostraron los resultados obtenidos en el osciloscopio de las señales moduladas, a continuación los resultados de las simulaciones obtenidas, en la figura 4.5 se muestra primeramente el circuito empleado.

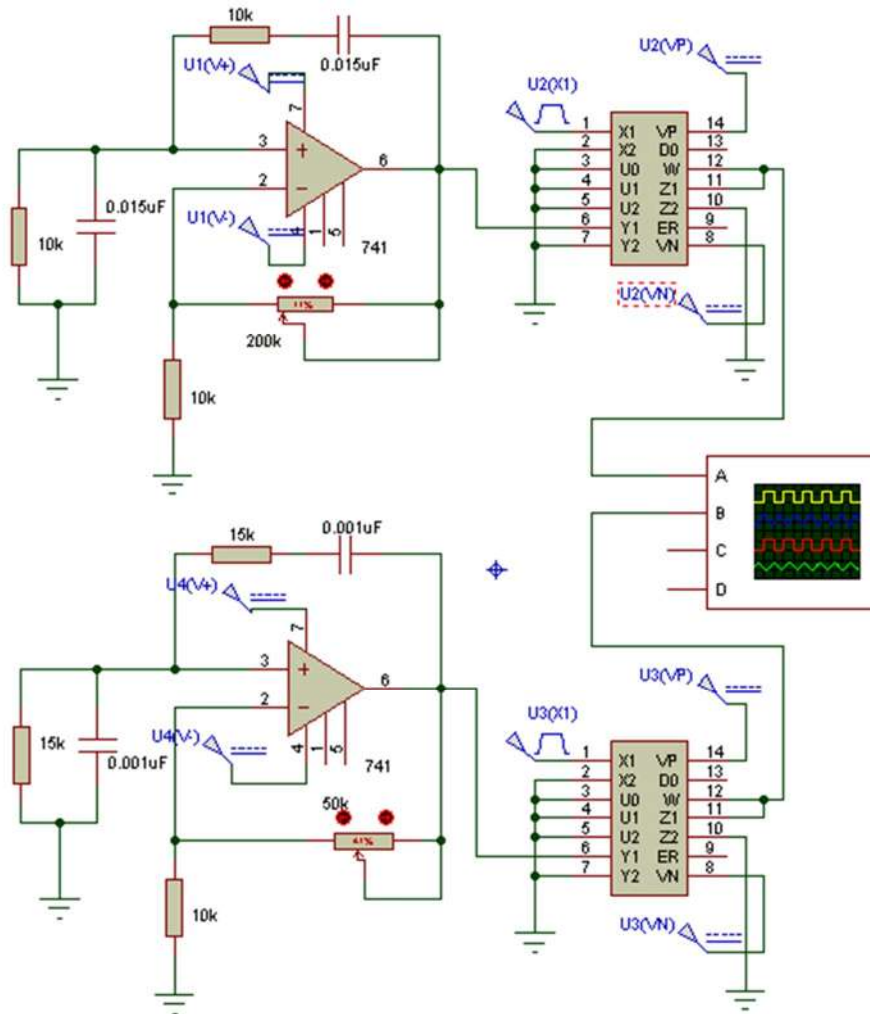


Figura 4.5 Simulación del bloque de modulación.

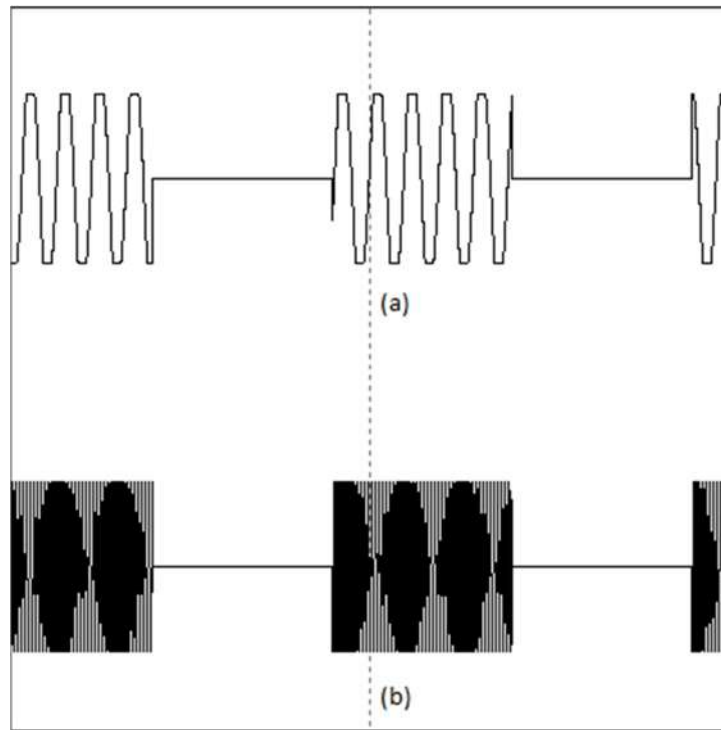


Figura 4.6 Simulación señales moduladas. (a) Señal modulada (1 kHz), (b) Señal modulada (10 kHz)

Los resultados obtenidos como se puede apreciar en la figura 4.6 son iguales por tanto se concluye que hasta este punto los circuitos implementados permiten una correcta modulación.

4.2.3 Mezclador de señales

Recordando el capítulo anterior la etapa que continua después de la modulación de señales, es la mezcla de ambas señales esto para poderlas transmitir por un sólo canal de información, el circuito mezclador permite llevar a cabo esta etapa en la imagen 4.7 se muestra la señal obtenida.

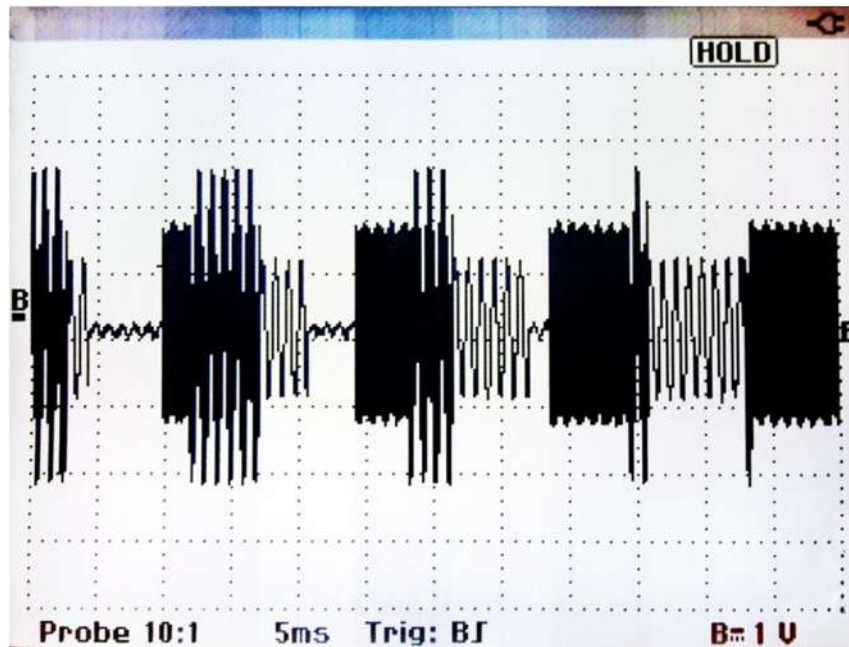


Figura 4.7 Señales mezcladas.

En la figura 4.8, se muestra el circuito utilizado hasta el momento, pero como se puede observar se adiciona el circuito mezclador de señales que se trato en el capítulo anterior, al igual que en los casos anteriores se esperarías obtener el mismo resultado en el caso real así como en las simulaciones.

En la figura 4.9, se muestran los resultados arrojados en la simulación del circuito de la figura 4.8, comparando los resultados de la simulación con los obtenidos realmente, podemos observar en ambas imágenes que la señal ya mezclada obtenida no tiene una forma simétrica, incluso en la simulación ambas señales modulantes se pierden en su totalidad dejando ver una señal completamente diferente, mientras que en el osciloscopio se aprecian algunas componentes visibles de alguna de las señales originales, sin embargo, esta también cambió de forma casi en su totalidad, conforme avancemos en el proceso de demodulación comprobaremos que podemos extraer los mensajes de ambas señales.

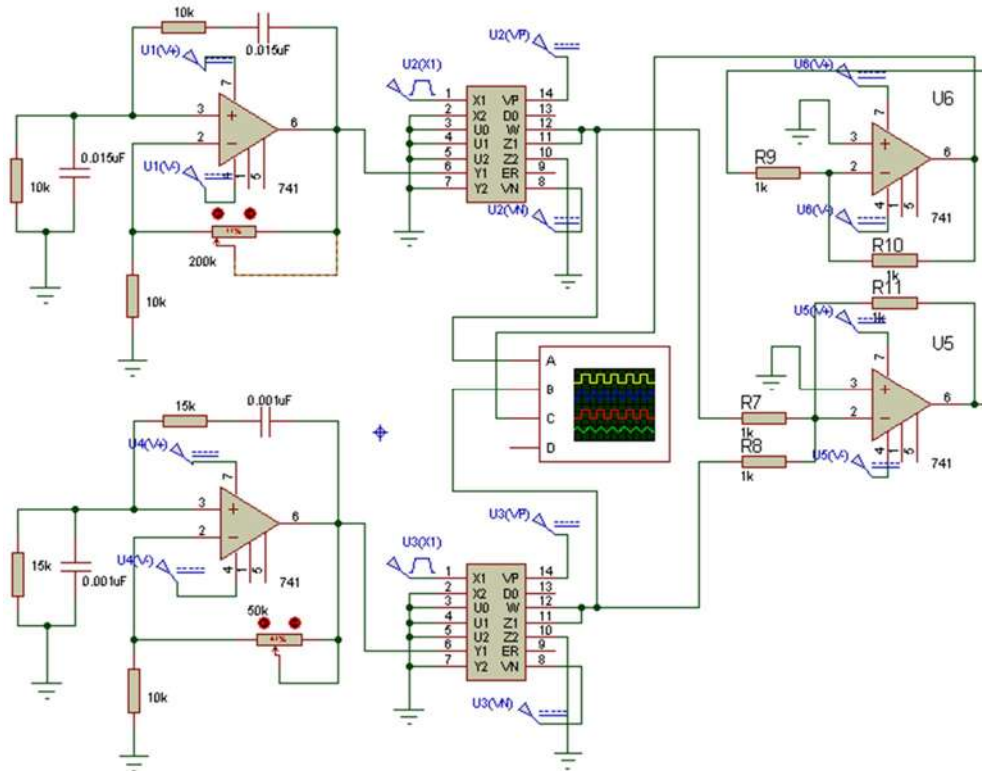


Figura 4.8 Simulación circuito mezclador de señales.

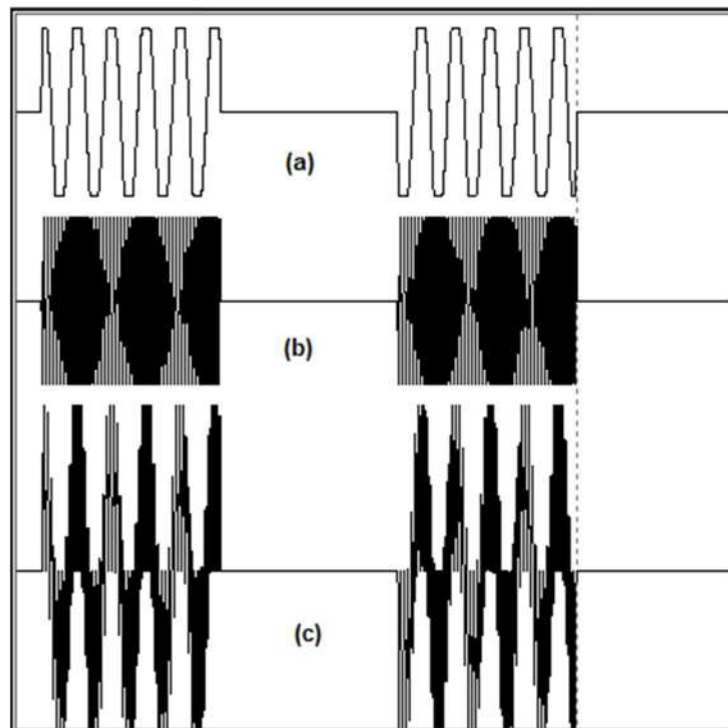
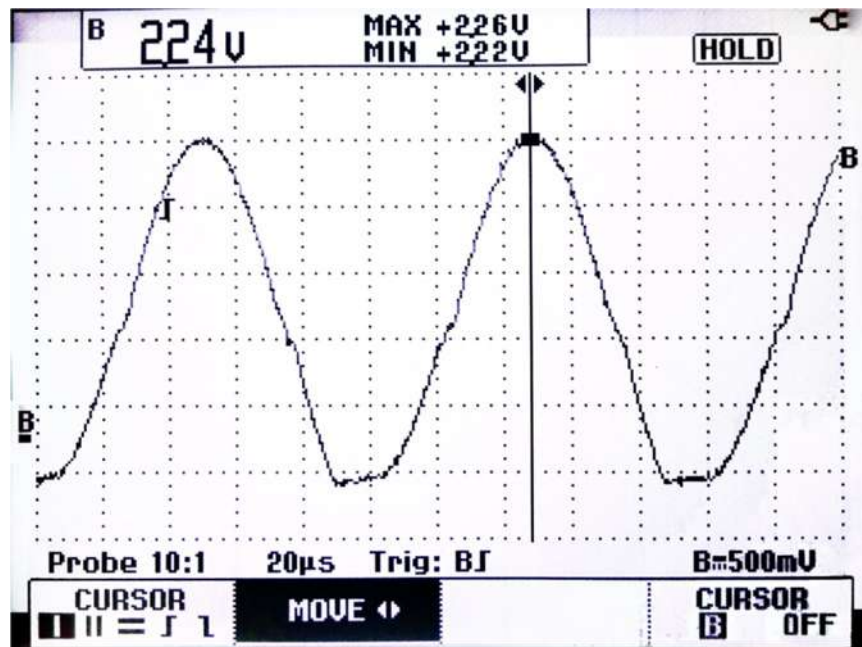


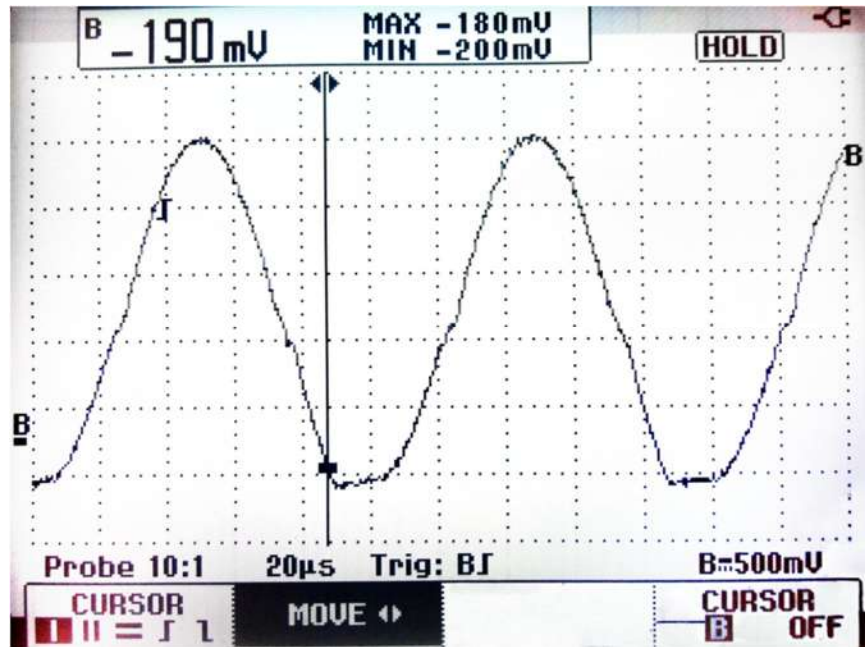
Figura 4.9 Resultante del mezclador de señales. (a) Señal modulada (1 kHz), (b) Señal modulada (10 kHz), (c) Señal mezclada

4.2.4 Ajuste de rango

El siguiente paso consiste en ajustar el rango de voltajes recordando que no se pueden transmitir voltajes negativos por el transmisor de fibra óptica. En la imagen presentada en la figura 4.10, demuestra el funcionamiento correcto de la etapa ajuste de rango, para lograr esto se hizo pasar una señal sinusoidal con un rango de -5V a 5V por el circuito de ajuste obteniendo valores que se encuentran dentro del rango deseado, en la imagen (a) se tomaron valores en el pico más alto de la señal obteniendo valores de 2.24 v, mientras que en la imagen (b) de igual forma se tomaron lecturas de valores en el pico más bajo de la señal obteniendo valores cercanos a 0v, con lo cual demostraríamos que la etapa de ajuste funciona dentro del rango deseado. La imagen 4.11 muestra el resultado obtenido cuando la señal mezclada se hace pasar por la etapa de ajuste, nótese que la señal es muy similar a la señal original mezclada (figura 4.7).



(a)



(b)

Figura 4.10 Etapa de ajuste de rango. (a) Ajuste pico alto (b) Ajuste pico bajo.

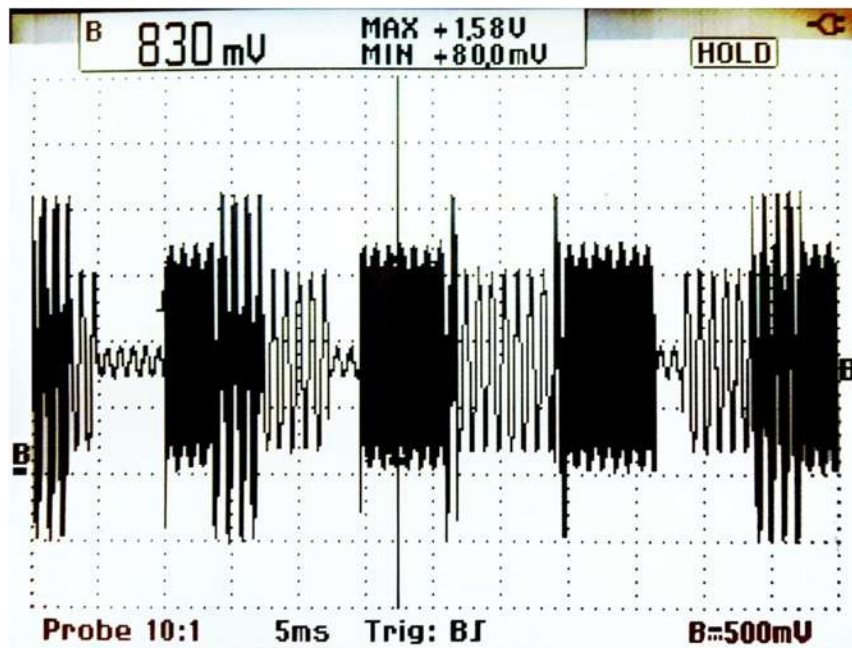


Figura 4.11 Señal mezclada en etapa de ajuste de rango.

En la figura 4.12 se presenta el circuito usado en la simulación que permite ajustar el circuito de voltajes de (-5V- -5V) a un rango de (0V – 5V).

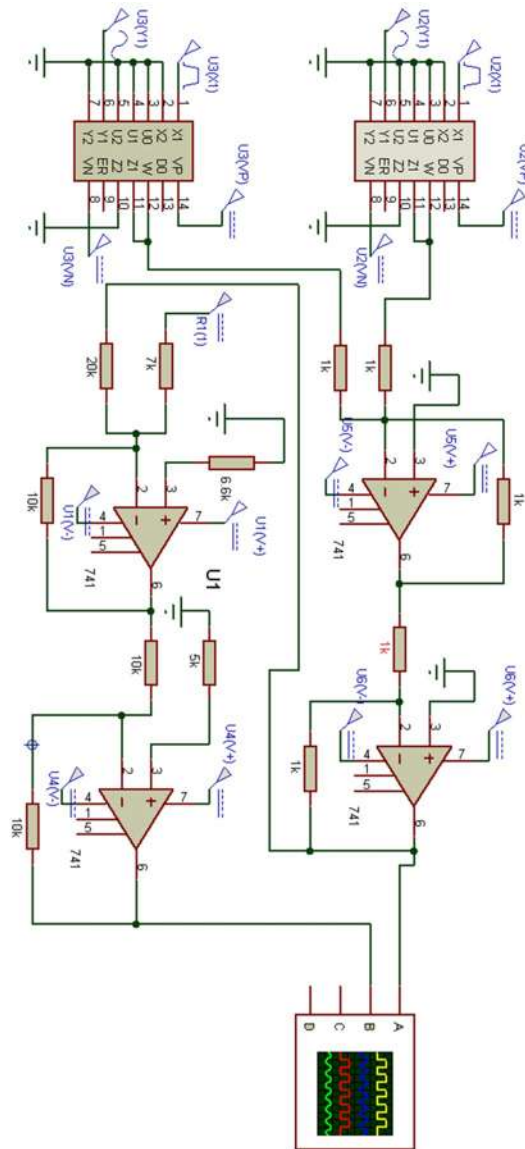


Figura 4.12 Diagrama de ajuste de rango.

Al igual que en la figura 4.10 se hace pasar una señal senoidal por el circuito de ajuste de rango pero ahora mediante el simulador, obteniendo los resultados de la figura 4.13, observe que los valores son muy cercanos a los obtenidos en el osciloscopio.

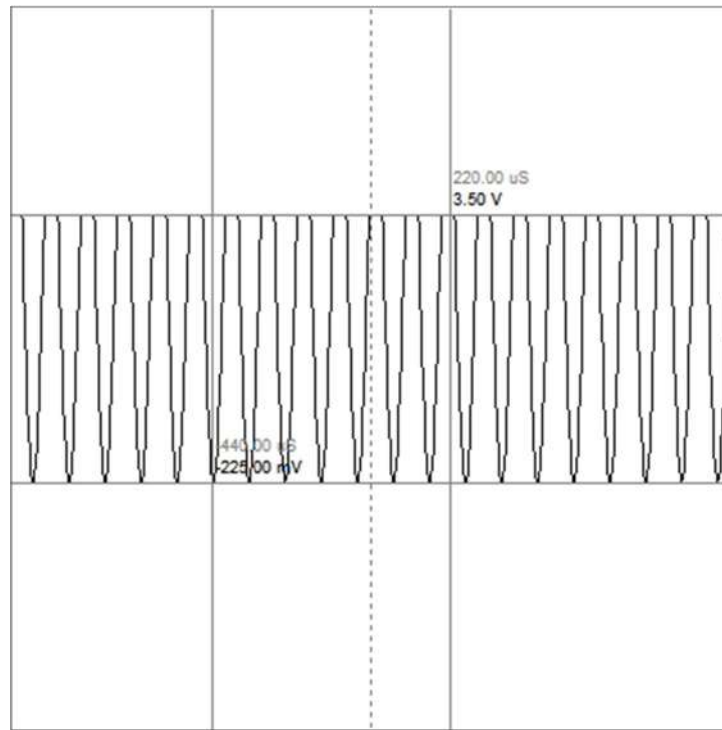


Figura 4.13 Señal sinusoidal en etapa de ajuste de rango mediante simulación.

En la figura 4.14, se hace pasar en la etapa de ajuste mediante el simulador la señal mezclada, obteniendo los resultados en la imagen mencionada, observe que la señal ubicada en la parte superior de la figura 4.14 es la señal original, donde se tomaron lecturas en los picos más altos de la señal obteniendo valores de 3.5 V en el valor más alto y -3.5 V en el valor más bajo, comparando la señal inferior la cual es la señal resultante de la señal mezclada obteniendo valores de 3.5 V en el pico más alto y 25 mV en el pico más bajo, por lo tanto la etapa de ajuste se puede concluir como satisfactoria, cabe mencionar que los valores obtenidos en el simulación así como los obtenidos realmente difieren un poco, esto debido a diversos factores como los materiales utilizados, la calidad de la fuente etc., sin embargo son valores satisfactorios y dentro del rango requerido para continuar en la siguiente etapa.

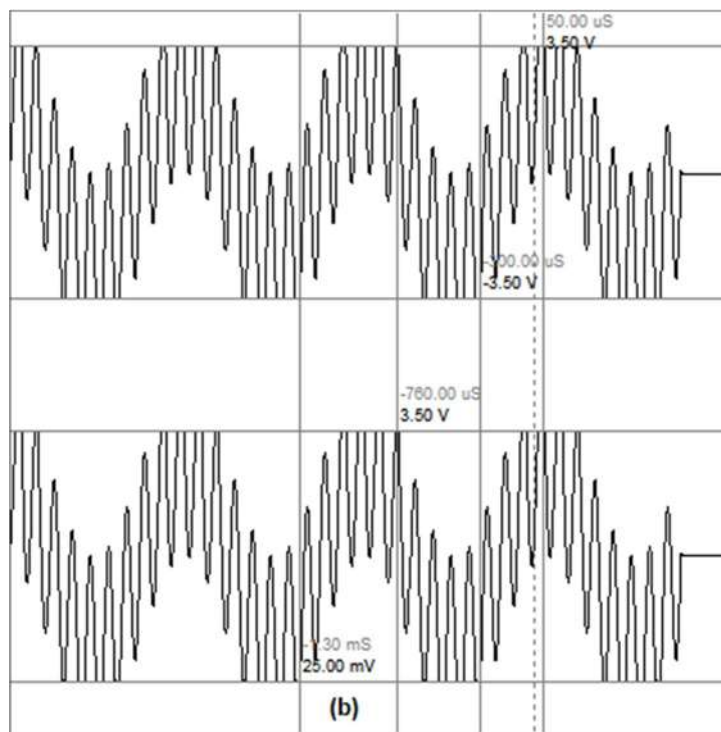
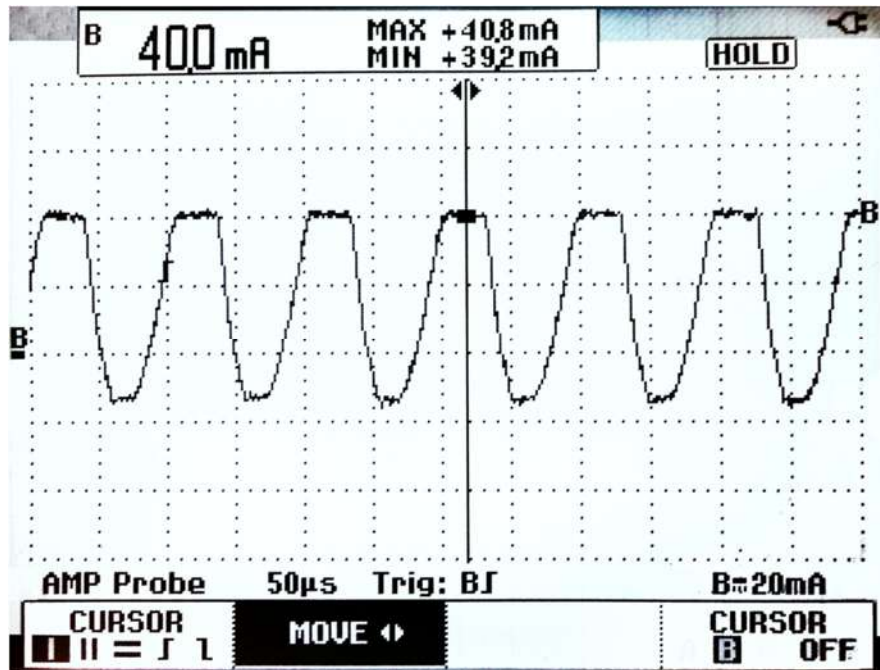


Figura 4.14 Señal mezclada en etapa ajuste de rango en simulación.

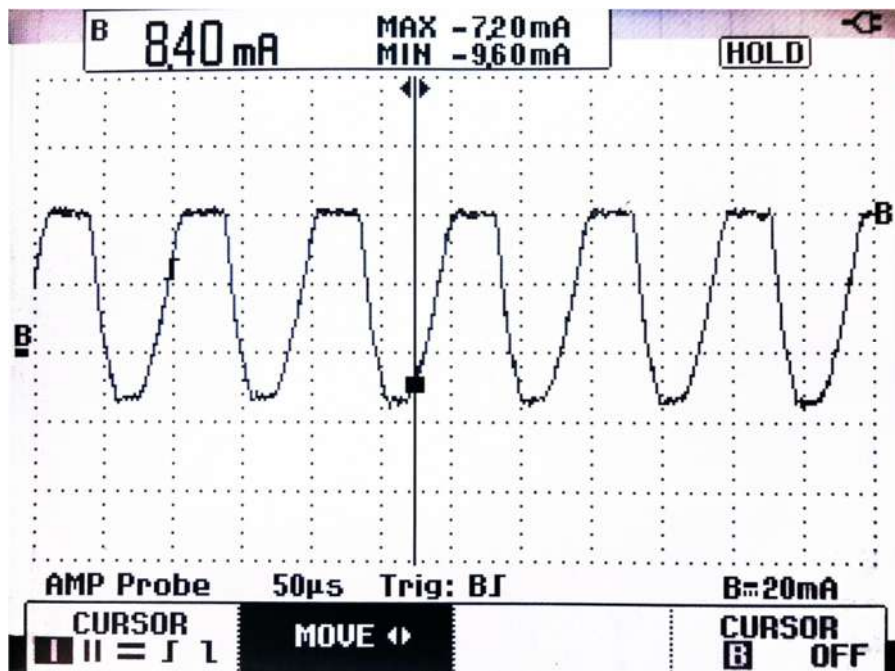
4.2.5 Acondicionamiento de la señal

Una de las etapas más importantes es el acondicionamiento de la señal, recordando el capítulo anterior esta etapa permite acondicionar la señal para poderla transmitir por el circuito HFBR-1402, el cual es el transmisor óptico utilizado el rango de operación de este circuito es de 0mA a 60mA. Hay que recordar que esta etapa es un convertidor de voltaje a corriente.

Al igual que en la etapa anterior pero esta vez con el uso del osciloscopio podemos determinar que el rango de operación es adecuado, induciendo una señal sinusoidal con un rango de 0V a 5V y haciendo un recorrido en varios valores que toma la señal, tomaremos lecturas para comprobar que encontramos dentro del rango para el uso apropiado del transmisor óptico. En la figura 4.15 se muestran los valores obtenidos. Observe que en la imagen superior (a) obtenemos un valor de 40.0 mA y en la imagen inferior (b) un valor de 8.40 mA, valores que se encuentran dentro del rango necesario requerido por el transmisor óptico HFBR-1402.



(a)



(b)

Figura 4.15 Señal sinusoidal en convertidor de voltaje a corriente (a) Valor obtenido en pico más alto, (b) Valor obtenido en pico más bajo.

Por último la imagen 4.16 muestra la señal mezclada proveniente del circuito de ajuste de rango resultante del convertidor de voltaje-corriente, observe que el osciloscopio tiene la propiedad de mostrar los rangos de voltaje totales que contiene la señal en cuestión, en este caso como se muestra en la imagen siguiente los valores van de 4.0 mA como mínimo y 41.2 mA como máximo. Valores que no sobrepasan el rango necesario para operar el transmisor óptico.

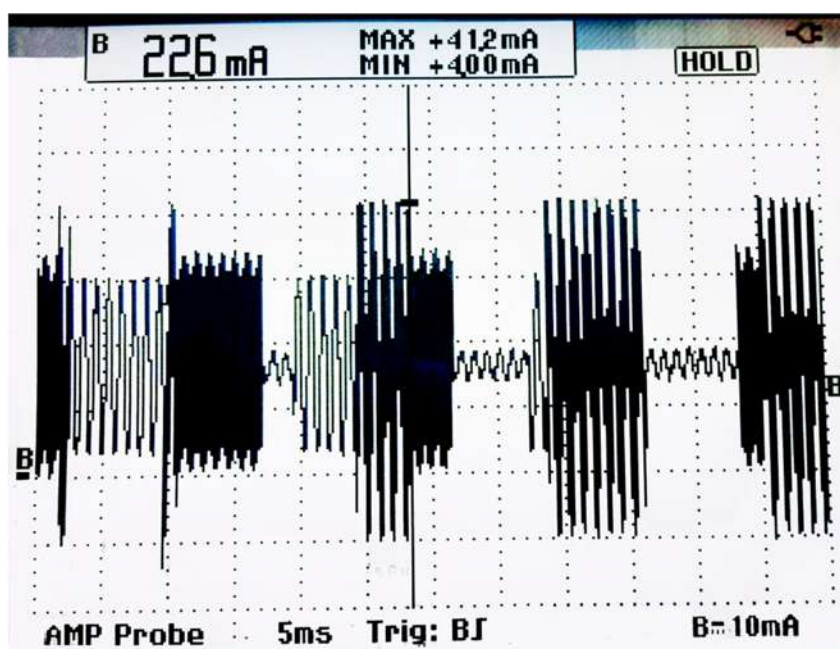


Figura 4.16 Señal resultante en convertidor de voltaje – corriente.

En las simulaciones correspondientes no se puede comprobar los valores obtenidos anteriormente debido a que el osciloscopio del simulador contiene opciones muy limitadas, sin embargo los valores en voltaje y la forma de la señal es muy similar a la obtenida en el osciloscopio, en la imagen 4.17. Se presenta el circuito utilizado en la simulación, además de los valores obtenidos en la simulación (figura 4.18).

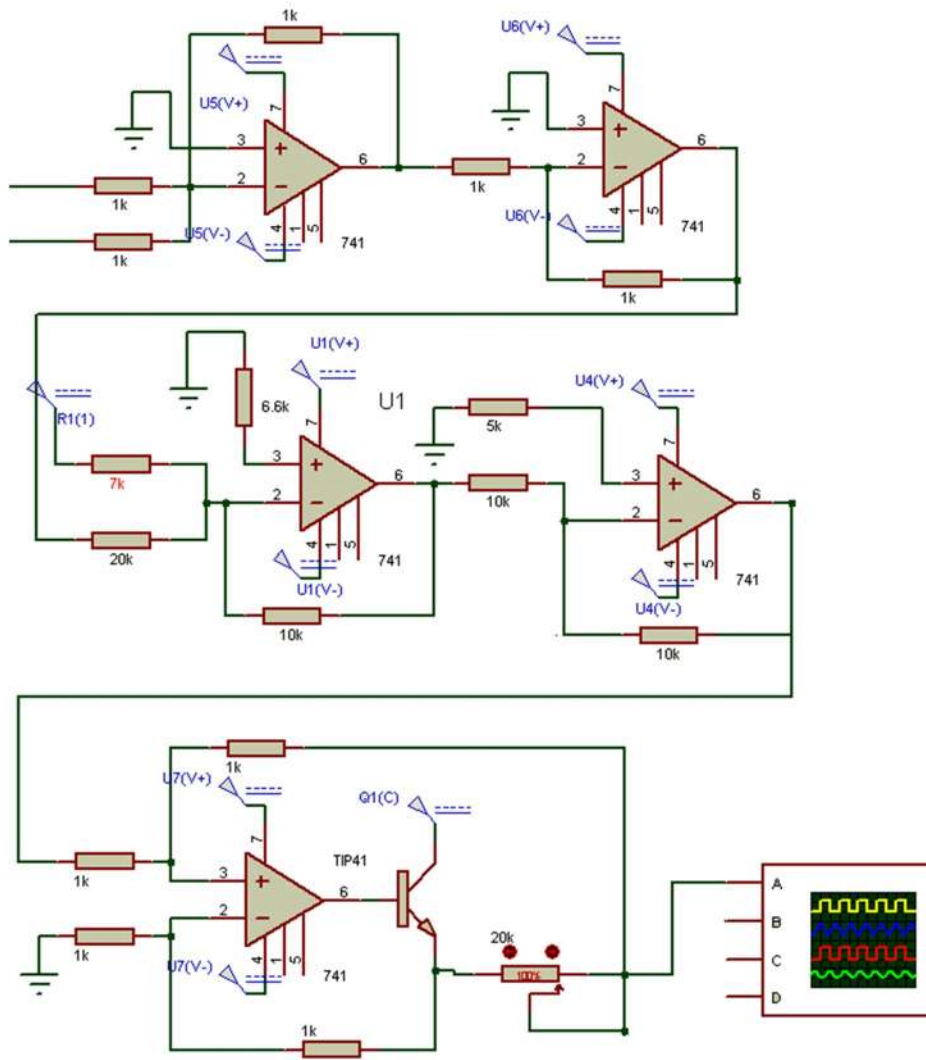


Figura4.17 Diagrama utilizado en la simulación del convertidor de voltaje - corriente.

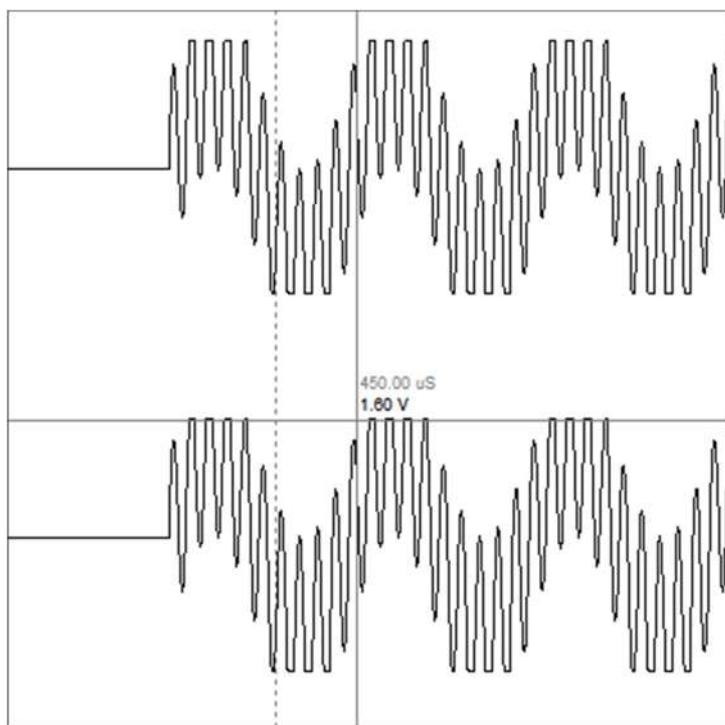


Figura 4.18 Señal obtenida en la simulación del convertidor de voltaje – corriente

4.3 Sistema de recepción múltiple

El primer paso para obtener los mensajes digitales es la eliminación de la componente de directa generada por el detector óptico HFBR-2402, lo cual se logra mediante un filtro pasa altas, como se menciona en el capítulo anterior obteniendo la señal de la imagen 4.16 mostrada anteriormente, posteriormente el siguiente paso consiste en separar las señales.

4.3.1 Separación de las señales moduladas

Una vez eliminada la componente de CD y la eliminación de las frecuencias bajas, procedemos a separar las señales mezcladas que se obtuvieron en el circuito de detección óptica, en esta parte se implemento el filtro pasa banda angosta, en las imágenes siguientes se comparan las señales originales contra las señales obtenidas, en

la figura 4.19 presentada a continuación se muestra la señal modulada recuperada a 1 khz, donde la señal del canal A es la señal recuperada, mientras que la señal del canal B es la señal original.

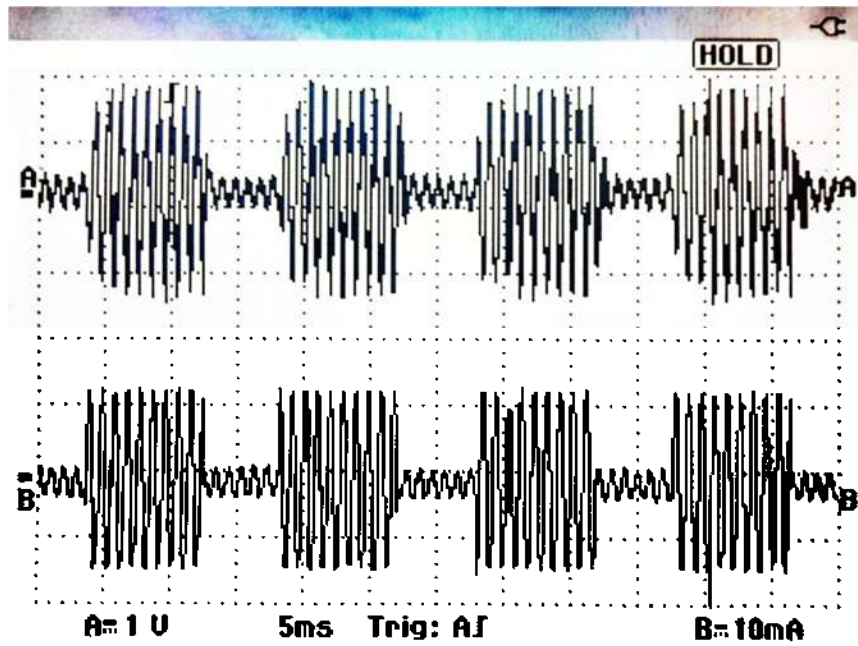


Figura 4.19. Señal obtenida a 1 kHz contra la señal original. Canal A señal recuperada, Canal B señal original.

Observe que la señal obtenida se encuentra un poco distorsionada esto debido a los procesos a los que fue sometida para poder transmitirla, sin embargo la señal no pierde sus propiedades básicas ni su forma como señal modulada ASK.

Para la señal modulada a 10 KHz se aprecia un mejor parecido con la señal original, esto se debe a la diferencia de velocidades, en caso de existir alguna discrepancia en el mensaje original, la señal digital será reconstruida en su totalidad, al término de las etapas que constituyen el modelo de recepción múltiple, en la figura se muestra la señal recuperada a 10 kHz en el proceso de separación de señales.

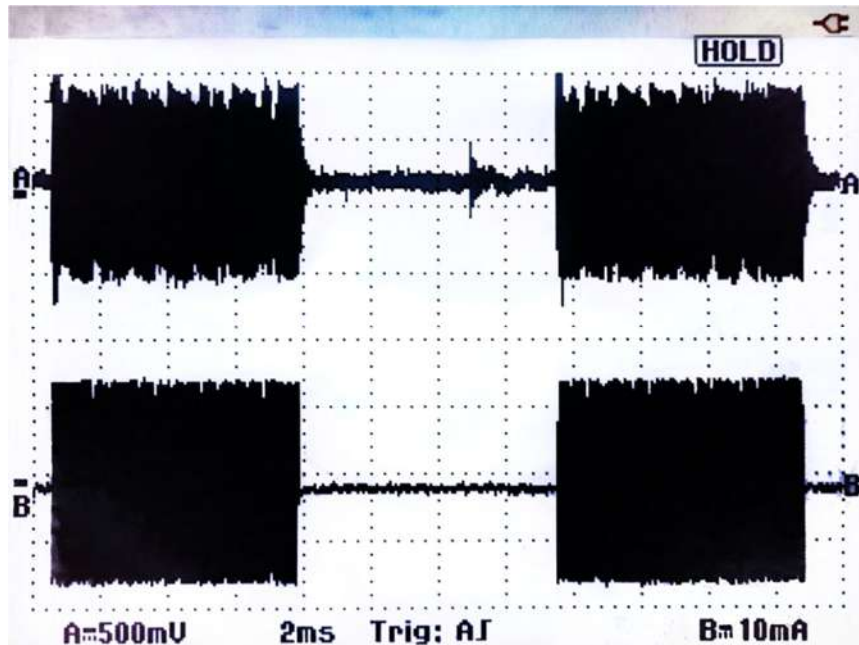


Figura 4.20. Señal obtenida a 10 kHz contra la señal original Canal A señal recuperada, Canal B señal original.

Comparemos ahora los resultados de las señales obtenidas mediante la simulación, el filtro pasa-banda angosta utilizada en este proceso se muestra en el diagrama de la figura 4.21. En la imagen 4.22, se muestra un comparativo de las señales recuperadas contra las señales originales de la misma manera como se realizó anteriormente, observemos que los resultados no difieren mucho de las señales originales, con lo cual se puede concluir como satisfactoria la etapa de separación de señales.

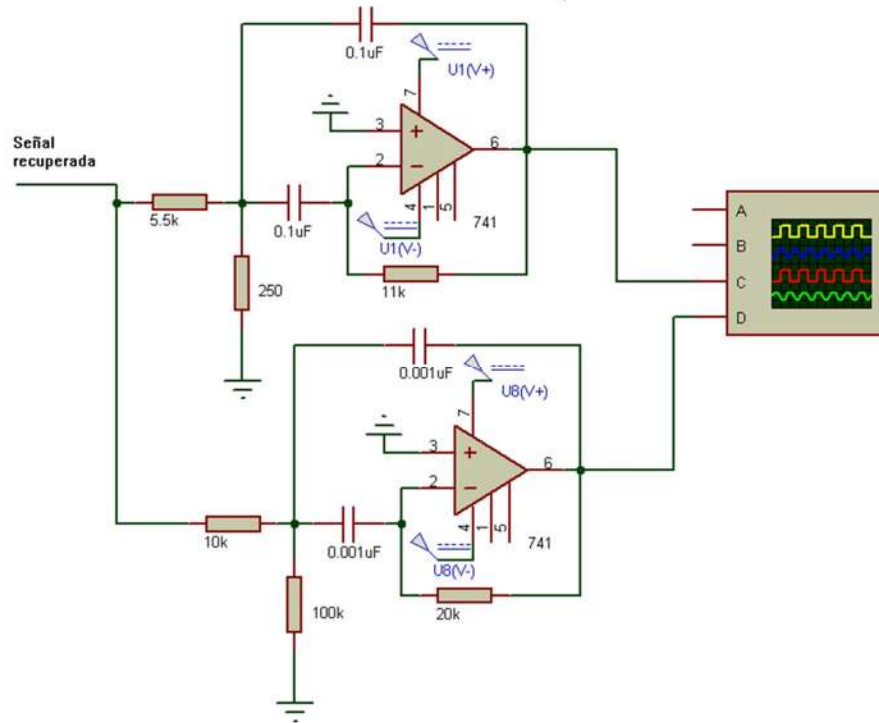


Figura4.21 Diagrama del Filtro pasa banda angosta.

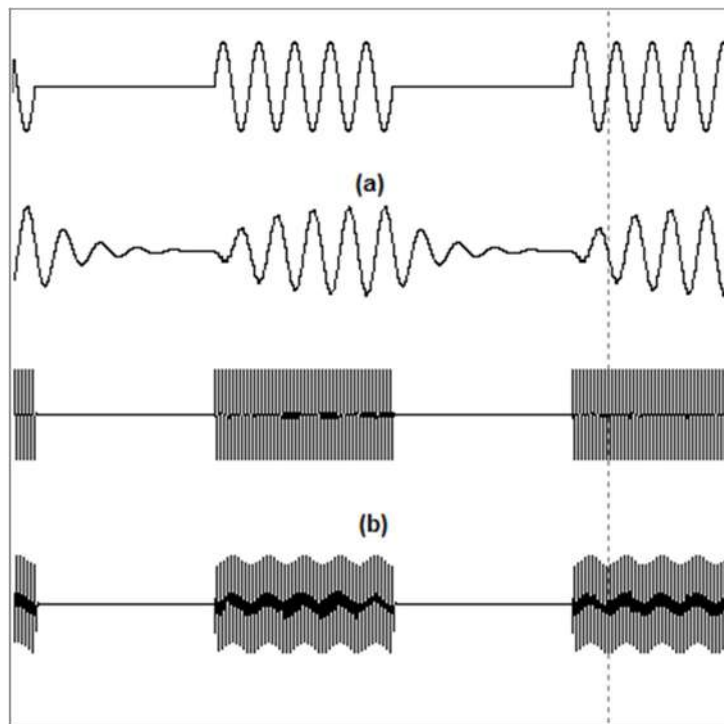


Figura 4.22. Señales recuperadas mediante simulación (a) Señal modulada a 1 KHz
(b) Señal Modulada a 10 KHz

4.3.2 Proceso de demodulación de las señales

A partir de este punto para extraer las señales originales el proceso es inverso al que se utilizó para modular las señales digitales, recordando el método utilizado es la **Detección Síncrona**, donde la señal modulada se multiplica por una sinusoidal de la misma frecuencia que la señal portadora, así en la imagen siguiente se muestran las señales obtenidas después del proceso de demodulación.

A) Demodulación de la señal a 10 kHz

El resultado de la demodulación de la señal a 10 kHz se presenta en la imagen presentada a continuación, note en la imagen que la señal toma la forma del mensaje digital original, es decir la señal modulada pierde toda componente negativa quedando únicamente los pulsos en alto del mensaje original, sin embargo la señal obtenida aun contiene componentes de la señal portadora utilizada para su transportación, mas adelante eliminaremos toda componente de la señal portadora.

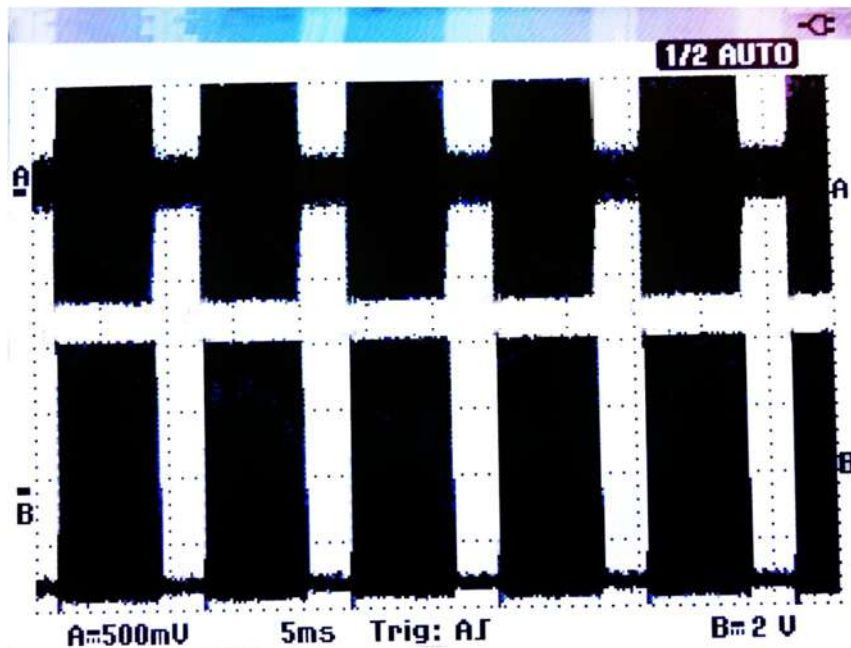


Figura 4.23 Proceso de demodulación de la señal a 10 kHz. Canal A: Señal modulada recupera, Canal B: Señal demodulada.

En la imagen 4.24 se muestra el circuito utilizado en el proceso de demodulación en simulación, observe que en el circuito se implementó adicionalmente el circuito que nos permitirá reconstruir la señal original, se trata de un amplificador operacional en su configuración de COMPARADOR sin retroalimentación, circuito utilizado comúnmente para convertir una señal senoidal en señal cuadrada, en nuestro caso únicamente lo utilizamos para eliminar los risos provenientes del proceso al que fue sometida la señal y para obtener una señal más simétrica, el resultado de esta conversión se muestra más adelante.

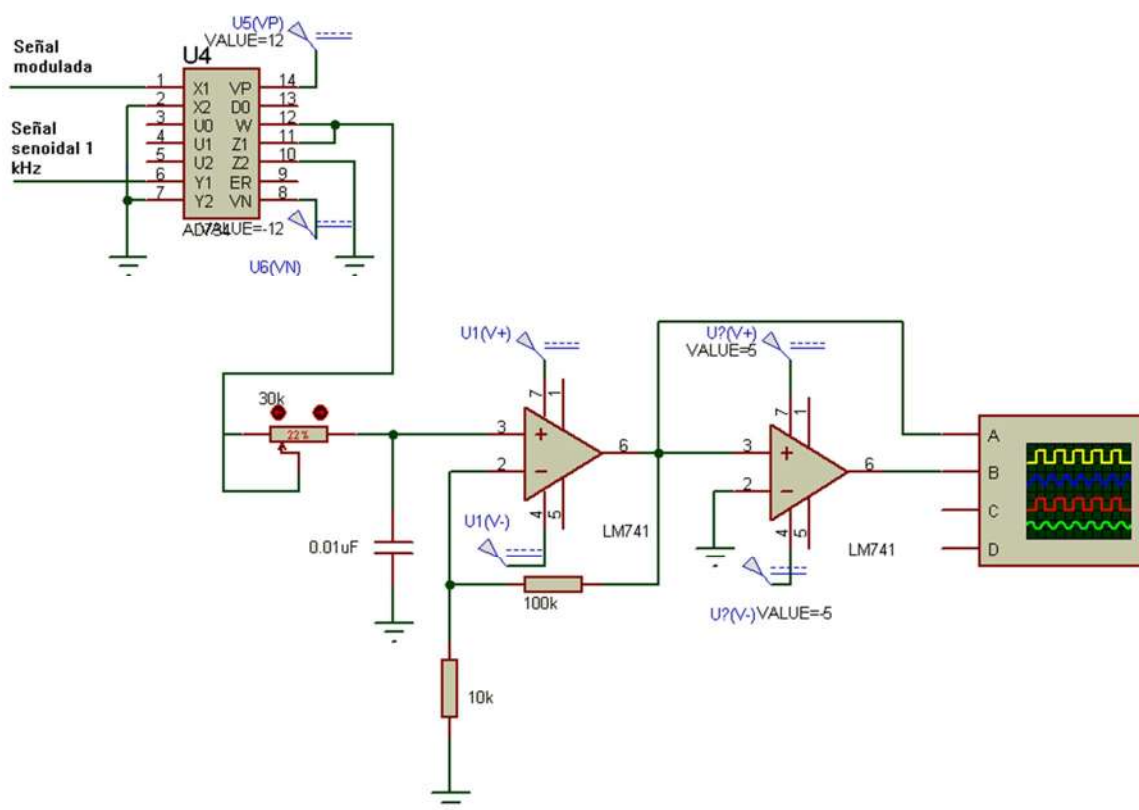


Figura 4.24 Diagrama utilizado en la demodulación y reconstrucción.

La figura 4.25 es el resultado del proceso del circuito anterior específicamente en la etapa encargada de la demodulación, observe que en la imagen que la señal superior es la señal recuperada mientras la señal inferior es la señal resultado de la Detección Síncrona.

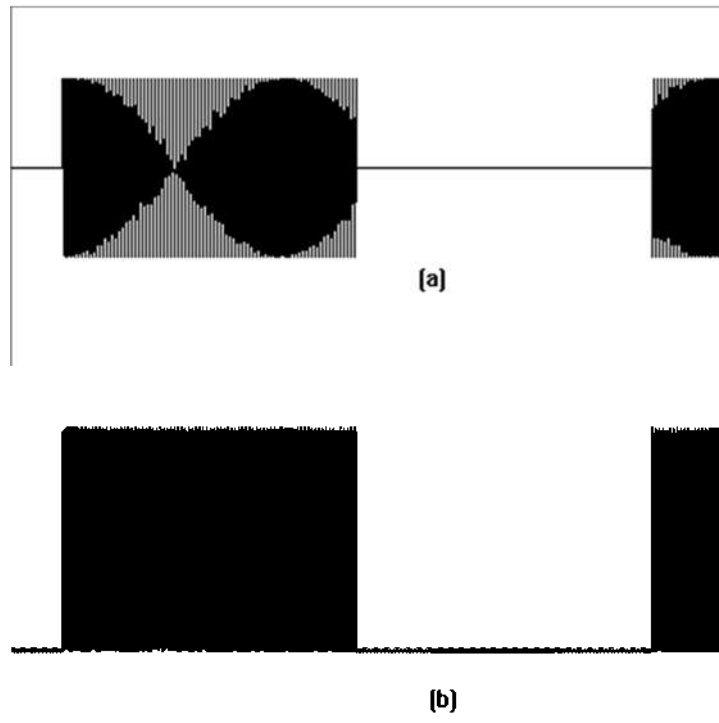


Figura 4.25 Proceso de demodulación señal 10 kHz. (a) Señal recuperada. (b) Señal demodulada por detección Síncrona.

A.1) Reconstrucción del mensaje digital

Como se mencionó anteriormente el circuito de la figura 4.20 contiene el proceso completo de la demodulación y reconstrucción, por lo tanto en la figura 4.26 se muestra el resultado de la etapa de eliminación de la portadora mediante el uso de un filtro pasa bajas, y la reconstrucción del mensaje original.

En la figura 4.26, la señal del canal A es la señal recuperada, mientras tanto la señal del canal B, corresponde a la señal reconstruida.

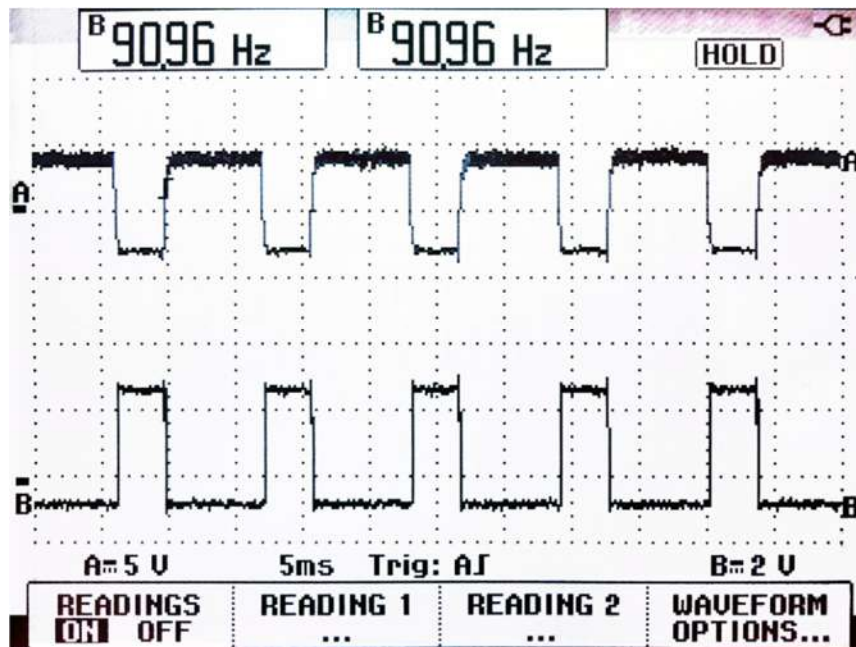


Figura 4.26. Eliminación de la señal Portadora y reconstrucción del mensaje. Canal A, señal recuperada. Canal B, Mensaje reconstruido.

Ahora pasamos a la eliminación y reconstrucción por el método de simulación, de la misma manera el circuito utilizado es el que se muestra en el diagrama de la figura 4.24 hay que recordar que el objetivo de este circuito es eliminar toda señal superior a 100 Hz el cual es la frecuencia del mensaje digital esto es válido para ambas señales ya que el mensaje en ambos casos no sobrepasa esta velocidad, cualquier componente superior a esta frecuencia debe de ser suprimida es por esta razón que el circuito es válido en ambos casos. A continuación se muestra el mensaje obtenido una vez eliminada la señal modulada a 10 kHz figura 4.27), mientras que en la figura 4.28 se muestra la señal ya reconstruída.

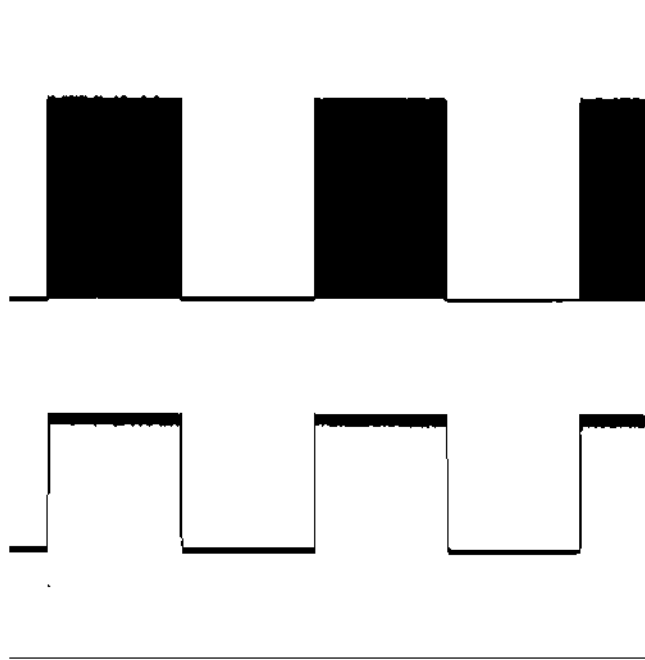


Figura 4.27 Eliminación de la señal portadora.

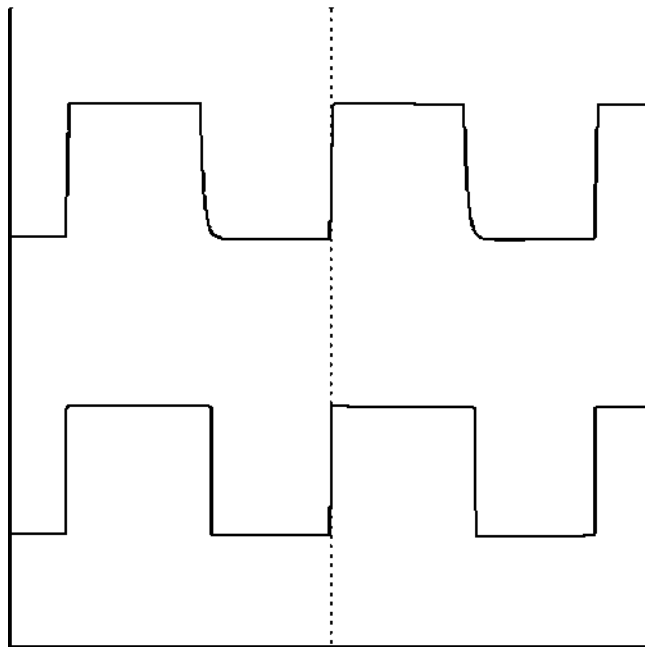


Figura 4.28 Reconstrucción del mensaje digital 1.

b) Demodulación de la señal a 1 kHz

Para la demodulación de la señal a 1 KHz el proceso a seguir es el mismo también el diagrama utilizado es el mismo que se utilizó anteriormente, por lo tanto sólo presentaremos los resultados obtenidos en la figura 4.29 se muestra la señal obtenida en el osciloscopio de este proceso.

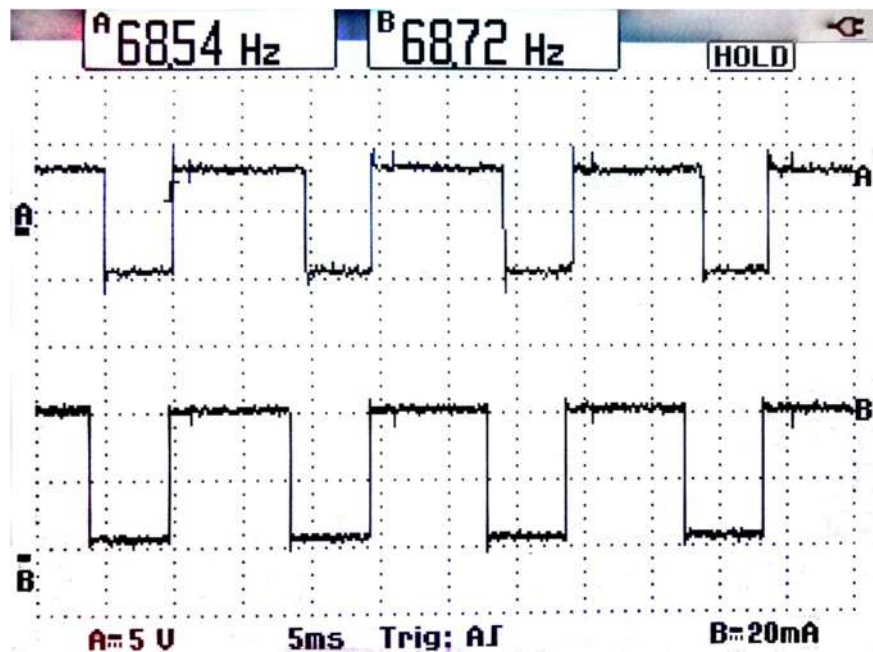


Figura 4.29 Señal obtenida del proceso de demodulación de la señal a 1 kHz.

De la misma manera el proceso en la simulación es el mismo y los resultados son muy similares, recordando que el filtro se utilizó en ambos casos sin modificaciones, en la figura 4.30 se muestra la señal reconstruida del mensaje 2.

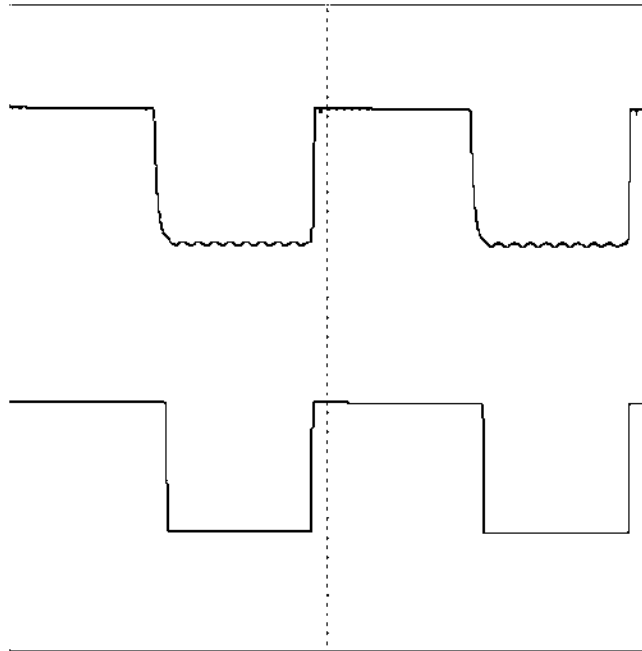


Figura 4.30 Reconstrucción del mensaje digital 2.

Capítulo 5

DISEÑO PCB DEL SISTEMA DE TRANSMISION Y RECEPCION MULTIPLE

5.1 Introducción

En este capítulo hemos llegado a la etapa final en cuanto a diseño, una vez terminadas las pruebas y simulaciones correspondientes hemos comprobado con éxito que los diseños utilizados son correctos, ahora presentaremos los diseños propuestos del sistema de transmisión así como el de recepción múltiple, el programa utilizado para llevar a cabo este capítulo es el **Eagle pcb** y un motor de render llamado **POV RAY** para la elaboración de circuitos electrónicos en 3D. Es importante mencionar que este capítulo es breve ya que únicamente se presentaran los diseños, sin entrar en detalles de las herramientas o técnicas utilizadas.

5.2 Diseño PCB del Sistema de transmisión múltiple

Primeramente, el diseño de la placa en 2D para el sistema de transmisión múltiple se presenta en las imágenes siguientes; en la primera imagen (figura 5.1) se muestra la placa por la parte superior, donde se aprecia la posición de los componentes. En la figura 5.2 se muestra la placa por la parte de las pistas siendo esta la imagen inferior de la placa, mientras que en la figura 5.3 se presenta el diseño terminado por la parte superior de la placa, agregando transparencia a la placa lo cual deja ver tanto los componentes como las pistas.

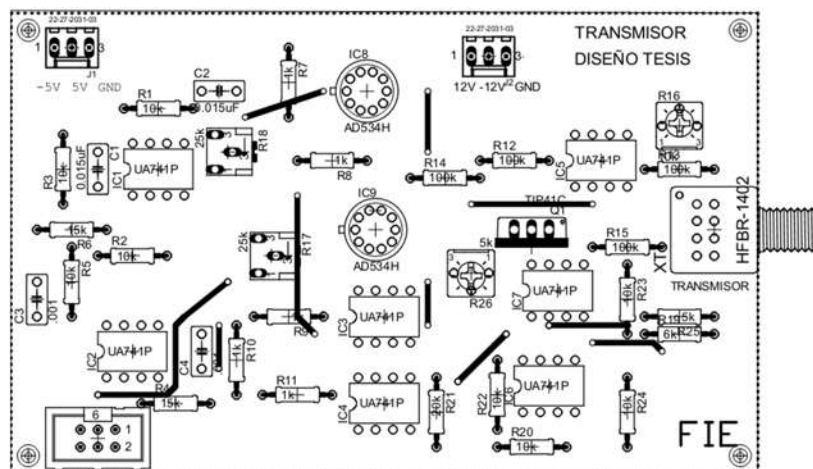


Figura 5.1 Diseño placa transmisor vista superior

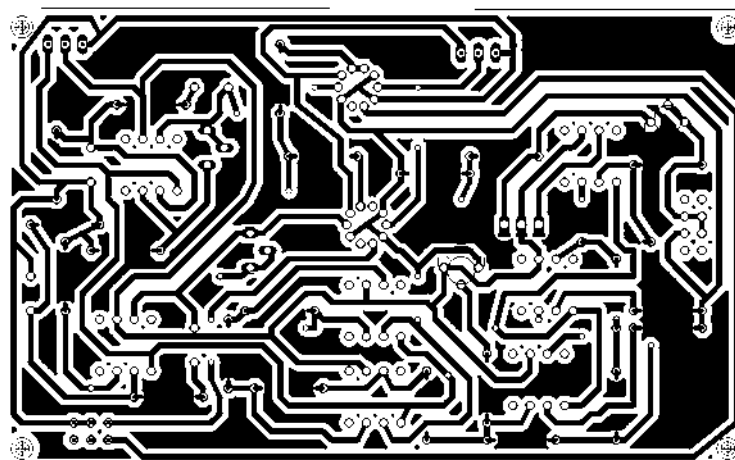


Figura 5.2 Diseño placa transmisor vista inferior

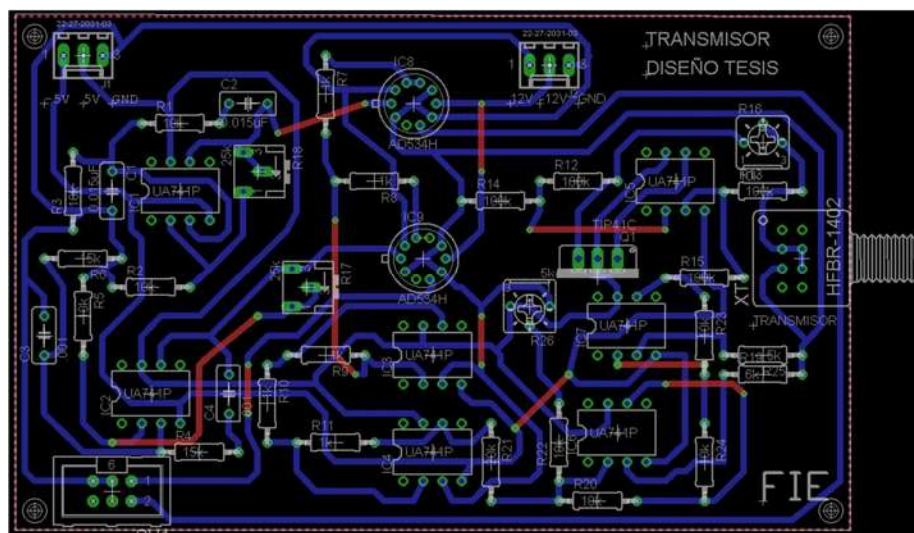


Figura 5.3 Diseño placa transmisor vista con transparencia

Una vez terminado nuestro diseño echamos mano a una herramienta conocido como Eagle 3D, la cual ayudará a crear una imagen en 3D a partir de nuestra placa terminada y con una herramienta encargada de realizar diseños en 3D llamada POV ray, procedemos a realizar un render de nuestra placa teniendo finalmente nuestro diseño terminado el cual se muestra en la figuras siguientes. Con esto concluimos finalmente todo lo que se refiere al diseño del circuito de transmisión, en la figura 5.4 se muestra el diseño terminado del transmisor mientras que en la figura 5.5 se muestra la placa por la parte inferior.

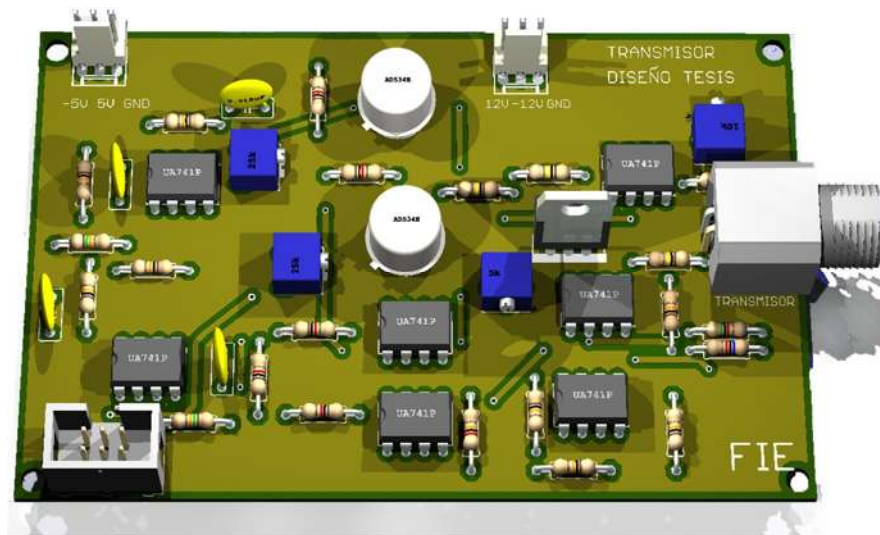


Figura 5.4 Diseño PCB superior del transmisor.

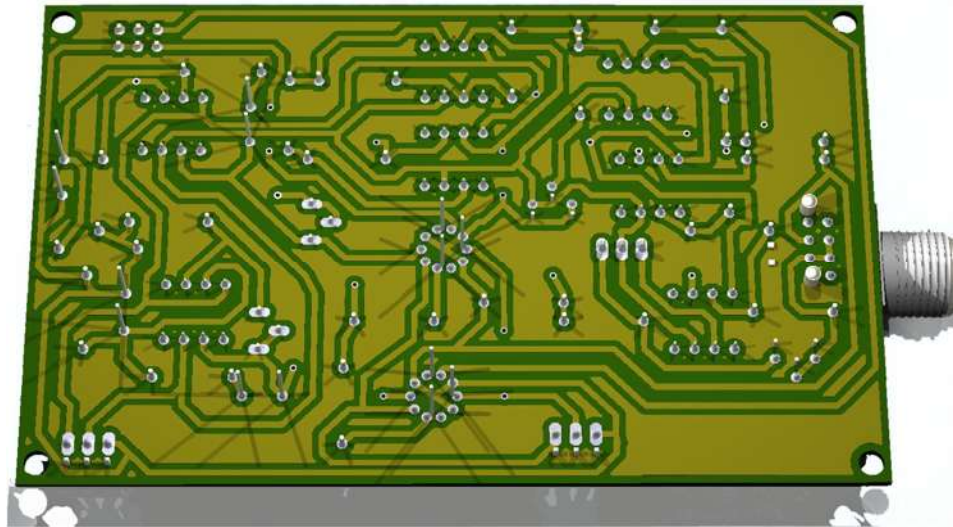


Figura 5.5 Diseño PCB inferior del transmisor.

5.3 Diseño PCB del Sistema de recepción múltiple

Una vez concluido todo cuanto se refiere al sistema de transmisión múltiple, ahora de igual manera daremos por terminado el sistema receptor con los diseños presentados a continuación y con lo cual llegaremos también a la etapa final de la presente tesis, en la figura 5.6 se muestran las posiciones de los componentes dentro de la placa. En la figura 5.7 el diseño por la parte de las pistas (parte inferior de la placa), de igual manera que en el diseño del transmisor la figura 5.8 muestra el diseño en vista con transparencia, esto únicamente con la finalidad de darse una idea más general de la ubicación de los componentes con respecto a las pistas, es importante recordar que el conector SV1 el cual se aprecia en la imagen presentada a continuación es la señal de salida, los pines 2 y 3 son las señales recuperadas esto se aprecia mejor en la imagen de transparencia.

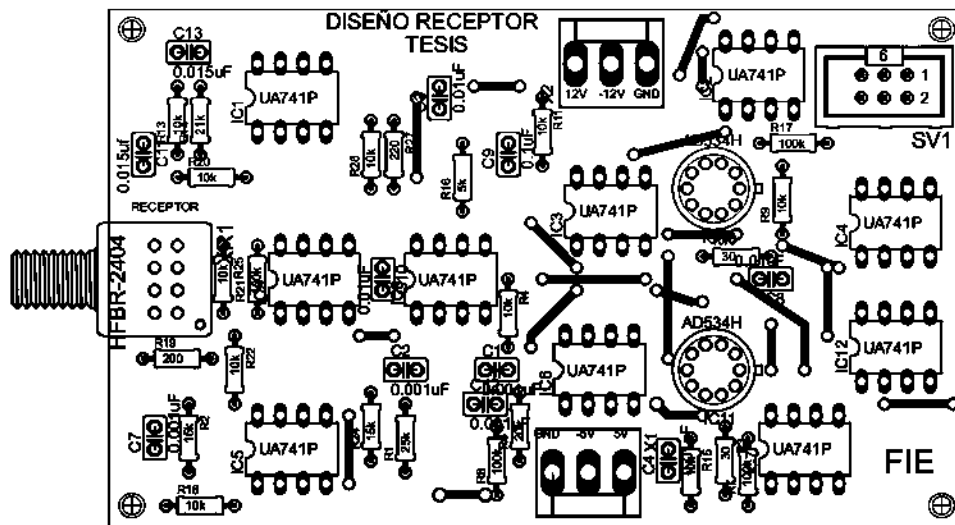


Figura 5.6 Diseño placa receptor vista superior

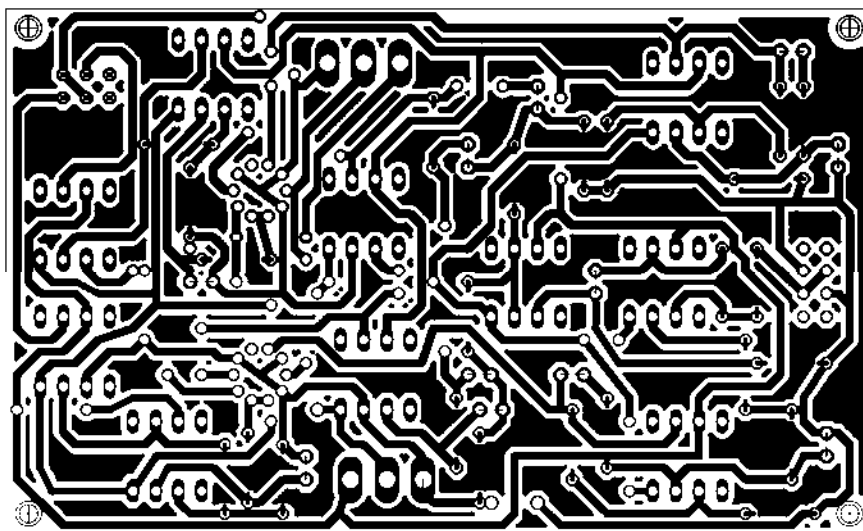


Figura 5.7 Diseño placa receptor vista inferior.

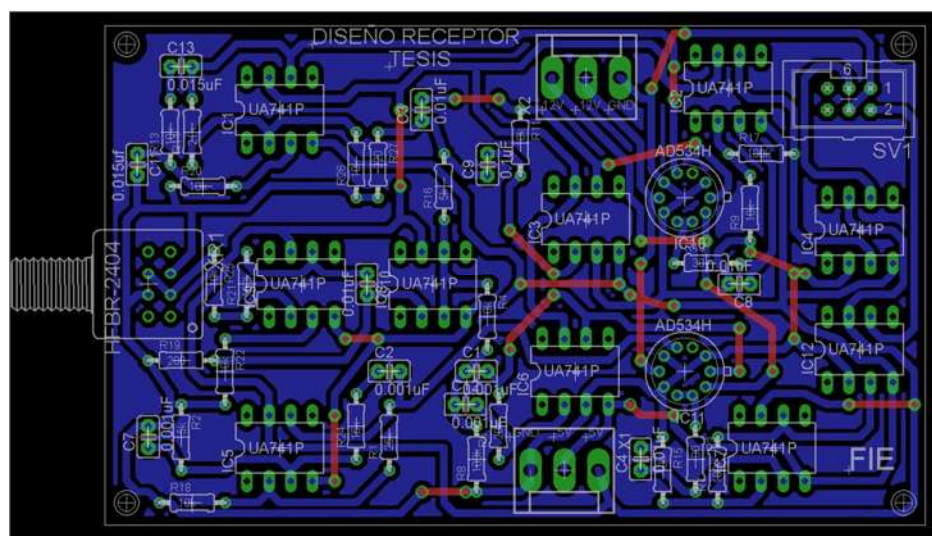


Figura 5.8 Diseño placa receptor vista con transparencia.

Por último, el diseño en 3D del sistema de recepción se muestra en las figuras 5.9 y 5.10, vista superior y vista inferior respectivamente. Con estos diseños damos por finalizado el capítulo así como esta investigación de tesis.

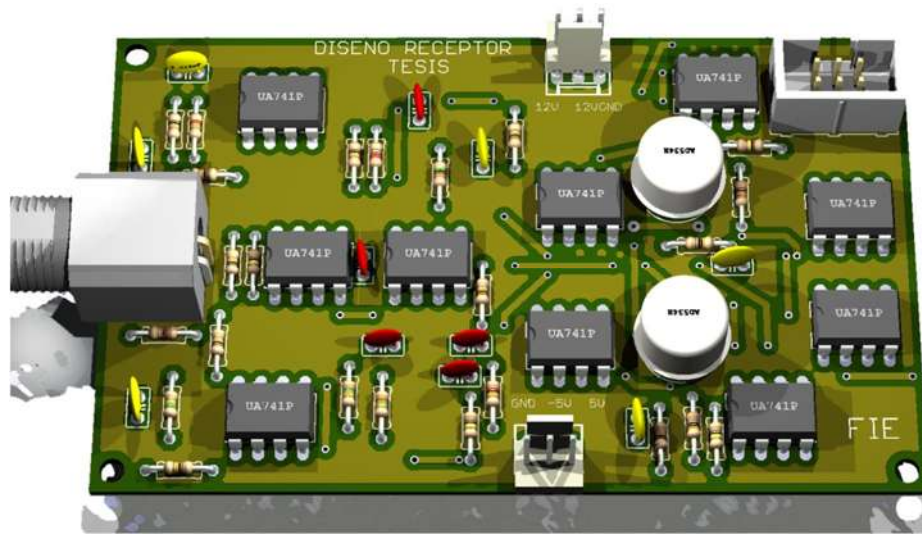


Figura 5.9 Diseño PCB superior del receptor.

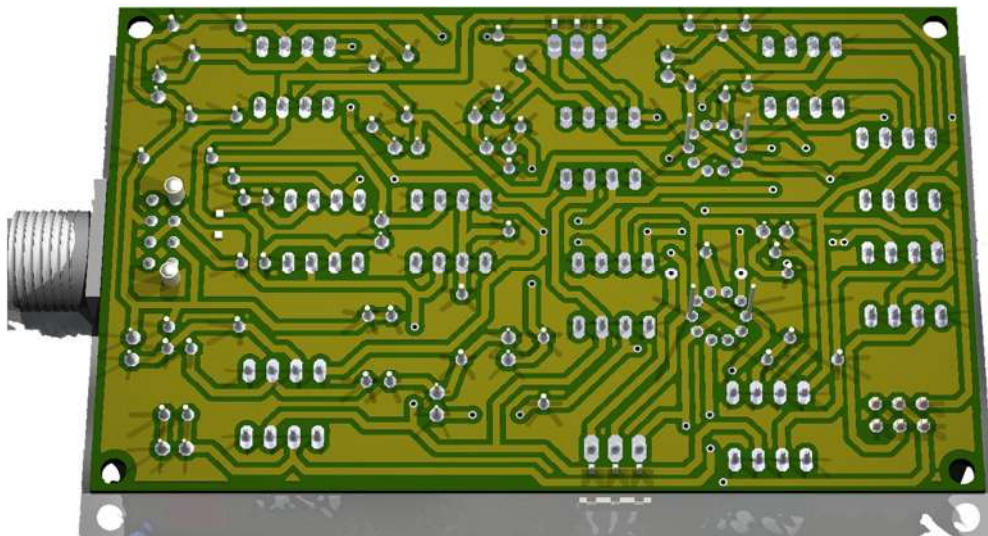


Figura 5.10 Diseño PCB inferior del receptor.

Capítulo 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Introducción

En el transcurso de la elaboración de la presente tesis, se realizaron diversas pruebas, así como se probaron distintas configuraciones en la elaboración de las etapas correspondientes al transmisor y receptor aunque los circuitos diseñados en ambas etapas satisfacen los requerimientos deseados, en este último capítulo haremos mención a algunas mejoras y recomendaciones, así también presentaremos las conclusiones sobre la realización del proyecto.

6.2 Conclusiones sobre la tesis

Es importante mencionar los antecedentes de la fibra óptica, esto con la finalidad de tener una idea más completa acerca del proyecto que se ha realizado, como se hizo mención en el capítulo 1, con ello daremos cuenta que esta tecnología si bien no es nueva, si ha evolucionado de una manera sorprendente y es en la actualidad que está teniendo gran impacto en las comunicaciones, tanto en video, transmisión de voz y transmisión de datos, en México la fibra óptica se ha convertido en un medio más que importante, necesario para las telecomunicaciones dentro del país, e incluso ha comenzado a desplazar a otros medios de transmisión importantes, como las microondas, las redes de cobre e incluso la telefónica celular ha comenzado a utilizar este medio tan eficiente de transmisión, lo cual supondría una mejora en el servicio que estas compañías ofrecen, sobre todo para la tecnología 3G y para los servicios de internet que brindan.

En el capítulo 2, se hizo mención al funcionamiento de la fibra óptica, lo cual es importante mencionar ya que conociendo como funciona es como daremos cuenta de por qué este medio de transmisión es el más eficiente en comparación con el cobre y otras tecnologías inalámbricas de transmisión, hay que recordar que también existen diversos tipos de fibras ópticas en el mercado, esto dependiendo de los datos que vayamos a transmitir y los tipos de señales, en pocas palabras para una señal en especial existe una fibra construida para transmitir ese tipo en específico de señal, esto nos brinda una gran ventaja ya que podremos enviar nuestras señales más eficientemente, sin embargo, esta tecnología como todas las demás, tiene sus contras y una de ellas muy importante es su costo y las herramientas que se tienen que utilizar, las Fusionadoras y los empalmes, por mencionar algunos además lo delicado de los cables de fibra que existen en la actualidad.

Sobre el capítulo 3, en general es donde se desarrolla en si el proyecto aquí se detalla el funcionamiento de cada una de las partes que componen el transmisor y receptor, aquí es donde se soluciona en papel los circuitos a implementar, así como las diferentes configuraciones que se deberán utilizar para lograr una transmisión y recepción exitosa, cabe recordar que se consideraron distintos diagramas, principalmente en las etapas de ajuste de rango, siendo estas las más delicadas en el sistema de transmisión, también se utilizaron distintos filtros para extraer la señal en el sistema de recepción, sin embargo, los presentados en ese capítulo son los que mejor satisficieron a nuestras necesidades.

Mas adelante en el capítulo 4, hemos comprobado que se pueden transmitir señales múltiples por un mismo canal de transmisión, logramos recuperar con éxito ambas señales la calidad de los mensajes transmitidos son aceptables, a pesar de que las señales fueron sometidas a diversos procesos los cuales afectan a cualquier señal que sea sometida, ya que las señales son vulnerables al ruido eléctrico así como a las discrepancias que puede haber al sincronizar las señales por el método de detección síncrona, sin embargo, por el método de simulación hemos comprobado nuestros resultados con lo cual podemos decir que los circuitos implementados son correctos, las pruebas fueron presentadas, cada una de las figuras mostradas en este capítulo

corresponde a alguna etapa o proceso mencionado en el capítulo 3, esto con la finalidad de comprobar que son correctos nuestros resultados, así como los circuitos y las distintas configuraciones utilizadas.

Por último, en el capítulo 5, se presentó el diseño del transmisor y receptor respectivamente, estos diseños si bien no fueron construidos, con esta técnica de crear circuitos en 3D, podemos dar una idea más real de cómo quedarán finalmente los circuitos diseñados en este proyecto, como se mencionó en ese capítulo, las imágenes presentadas son más grandes del tamaño real, esto únicamente con la finalidad de apreciar más los diseños concluidos, sin embargo, imprimiendo los diseños de las placas en escala real, podemos crear los circuitos tal y como se muestran en las figuras 3D, ya que ambos diseños se hicieron pensados en implementarlos posteriormente, sin embargo, la creación de estas placas no se incluyen en este proyecto de tesis.

En general las limitantes que tiene el diseño en cuanto a la transmisión de señales, teóricamente no existe un número determinado de señales que se pueden transmitir a partir de este diseño, ya que únicamente se transmite una señal por medio de la fibra óptica que contiene a las demás señales, de existir alguna limitación sería cuestión del circuito sumador inversor que teóricamente puede sumar hasta n señales. También se puede presentar alguna limitación en el número de componentes a utilizar, si se requiere mayor número de señales, la cantidad de circuitos electrónicos aumentaría lo que provocaría un costo mayor además de ampliar considerablemente el tamaño del diseño.

6.3 Recomendaciones sobre el sistema

Aunque el método utilizado principalmente para la demodulación ASK utilizado en este proyecto es la detección síncrona, cabe recordar que este tipo de modulación no es más que un caso particular de la modulación AM. Por lo tanto los demoduladores de Am son validos también para este tipo de transmisiones, particularmente la modulación por Detección de Envolvente, también conocido como demodulador No-Coherente, es una de las más comunes utilizadas en estos casos particulares, con esta se evitan los problemas de frecuencia y fase que aparecen en la detección síncrona, para este caso en particular la señal de alta frecuencia que llega al receptor se hace pasar por un dispositivo no lineal,

en este caso un diodo a la vez que se hace pasar por un filtro pasa bajas, este proceso se conoce como detector de envolvente. En la imagen se muestra el esquema generalizado para este tipo de demodulación.



Figura 6.1 Demodulador ASK detector de envolvente.

El detector por diodo emplea precisamente la acción rectificadora del diodo para rechazar la parte negativa de la señal compuesta (ASK) y con ella la envolvente inferior, y el filtro pasa bajas no puede seguir las variaciones rápidas de la señal, por lo que solamente se queda con la envolvente que dejó pasar el diodo. El adaptador de niveles aparece para corregir la diferencia de escala a la salida del demodulador.

Es importante señalar que la detección por envolvente de las señales ASK es algo inferior en calidad comparada con la detección síncrona, pero tiene la ventaja de ser una opción más económica y más sencilla de implementar es por esta razón esta se recomienda como una opción alternativa a considerar al utilizar este método de modulación.

Bibliografía

1. TOMASI, WAYNE. *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. PEARSON EDUCACION, cuarta edición. México, 2003, 976 Paginas. ISBN: 970-26-0316-1
2. HERRERA PEREZ, ENRIQUE. *Tecnologías y redes de transmisión de datos*. EDITORIAL LIMUSA, S.A. de C.V. GRUPO NORIEGA EDITORES, primera edición. México, 2003, 295 Paginas. ISBN: 968-18-6383-6.
3. HERRERA PEREZ, ENRIQUE. *Introducción a las Telecomunicaciones Modernas*. EDITORIAL LIMUSA, S.A. de C.V. GRUPO NORIEGA EDITORES, primera edición. México, 2004, 413 Paginas. ISBN: 968-18-5506-X.
4. PABLO ALCALDE SAN MIGUEL. *Electrónica General*. Ediciones Paraninfo, segunda edición. Madrid, España, 3ª impresión de 2010, 360 Paginas. ISBN: 978-84-9732-645-2.
5. ROBERT F. COUGHLIN. *Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales*. PRENTICE HALL HISPANOAMERICANA S.A de C.V. Quinta edición. México, 1998, 508 Paginas. ISBN: 0-13-206541-X.
6. GARCIA BREIJO, EDUARDO. *Compilador C CSS y Simulador PROTEUS para microcontroladores PIC*. MARCOMBO, EDICIONES TECNICAS, primera edición. Barcelona, España. 2008. ISBN: 978-84-267-1495-4.
7. CadSoft Computer., Inc. *EAGLE EASILY APPLICABLE GRAPHICAL LAYOUT EDITOR*. CadSoft Computer., Inc, segunda edición. USA 2004.