



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS
DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
SISTEMA MÚLTIPLE DE COMUNICACIÓN
POR FIBRA ÓPTICA

TESIS

PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA

Presenta

P.I.E. ANTONIO ANGUIANO MERAS

Asesor

Dr. GILBERTO GONZALEZ AVALOS

Morelia, Mich., Febrero del 2007

INDICE

CAPITULO 1 PROYECTO DE FIBRA ÓPTICA

1.1 Introducción.....	1
1.2 Objetivo.....	2
1.3 Estructura de la Tesis.....	2

CAPITULO 2 ANTECEDENTES DE COMUNICACIÓN POR FIBRA ÓPTICA.

2.1 Canales Clásicos de Transmisión.....	4
2.1.1 Ondas Hertzianas.....	4
2.1.2 Cables Eléctricos.....	5
2.2 Canal de Transmisión Óptica.....	6
2.3 Reseña Histórica.....	6
2.4 Descripción General en un Sistema de Comunicación por Fibra Óptica.....	7
2.4.1 Ventajas Potenciales.....	7
2.5 Propagación de la Luz en la Fibra Óptica.....	8
2.5.1 Reflexión y Refracción de la Luz.....	8
2.5.2 Utilización de la Reflexión Total Interna.....	12
2.5.3 Cono de Aceptancia.....	13
2.5.4 Apertura Numérica (NA).....	15
2.5.5 Dispersión Modal.....	15
2.5.6 Dispersión Cromática.....	15
2.6 Tipos de Fibra Óptica.....	16
2.6.1 Fibra de Índice Escalón de Modo Sencillo.....	16
2.6.2 Fibra de Índice Escalón Multimodo.....	17
2.6.3 Fibra de Índice Graduado Multimodo.....	18
2.7 Fuentes de Luz.....	19
2.7.1 Diodos Emisores de Luz.....	20
2.7.1.1 Led de Emisión Superficial.....	22
2.7.1.2 Led Emisor de Orilla.....	23
2.7.2 Tipos de Láseres.....	24
2.7.2.1 Emisión Espontánea.....	24

2.7.2.2 Emisión Estimulada.....	25
2.7.3 Principales Características de un Láser de Inyección.....	26
2.7.3.1 Flujo energético emitido en función de la corriente.....	27
2.7.3.2 Diagrama de radiación.....	27
2.7.3.3 Modulación.....	27
2.7.3.4 Degradación.....	28
2.8 Detectores de Luz.....	28
2.8.1 Respuesta.....	28
2.8.2 Corriente Oscura.....	28
2.8.3 Tiempo de Tránsito.....	28
2.8.4 Respuesta espectral.....	29
2.8.5 Diodo PIN.....	29
2.8.6 Diodo de Avalancha.....	29

CAPITULO 3 TRANSMISIÓN POR FIBRA ÓPTICA DE UN CONJUNTO DE SEÑALES.

3.1 Comunicaciones.....	31
3.2 Componentes de un Enlace Mediante Fibra Óptica.....	31
3.3 Problemática de un Enlace con Múltiples Señales.....	32
3.4 Enlace por Fibra Óptica de Señales Multiplexadas en Frecuencia.....	32
3.5 Transmisor.....	33
3.5.1 Amplificador de Instrumentación.....	33
3.5.2 Generación de Señal Portadora.....	34
3.5.3 Modulación de Amplitud.....	36
3.5.4 Multiplicador de Señales.....	38
3.5.5 Mezclador de Señales.....	40
3.5.6 Convertidor Voltaje-Voltaje.....	42
3.5.7 Convertidor Voltaje-Corriente.....	43
3.6 Transmisor Óptico.....	46
3.7 Fibra Óptica.....	47
3.8 Receptor.....	49
3.8.1 Receptor Óptico.....	49
3.8.2 Filtrado y Amplificación.....	50

3.8.3 Filtros Pasa-Banda.....	51
3.8.4 Demodulación.....	56
3.8.5 Filtro Pasa Bajas.....	58
3.8.6 Amplificación Final.....	60
3.9 Diagrama General para el Sistema de Tres Señales.....	61
3.9.1 Diagrama General para el Sistema De N Señales.....	63

CAPITULO 4 CONSTRUCCIÓN DEL CIRCUITO IMPRESO Y PRUEBAS.

4.1 Construcción del Circuito Impreso.....	64
4.2 Diseño del Circuito Impreso.....	64
4.2.1 Señales a Transmitir.....	72
4.2.2 Señales Portadoras.....	74
4.2.3 Modulación de Señales.....	75
4.2.4 Señal de Salida del Mezclador de Señales.....	78
4.2.5 Señal del Convertidor Voltaje-Corriente.....	78
4.2.6 Señal de Salida del Receptor Óptico.....	79
4.2.7 Señal de Salida del Filtro Pasa-Banda.....	81
4.2.8 Demodulación de Señales.....	85
4.2.9 Filtro Pasa-Bajas.....	88
4.3 Comparativa de Señales Transmitidas y Recibidas.....	89
4.4 Otras Pruebas.....	93

CAPITULO 5 CONCLUSIONES.

5.1 Conclusiones.....	97
-----------------------	----

BIBLIOGRAFIA.....	98
-------------------	----

APENDICE A. Especificaciones eléctricas del ICL8038.....	99
--	----

APENDICE B. Especificaciones Eléctricas del Multiplicador de Señales AD534J....	100
---	-----

APENDICE C. Especificaciones de Operación del Transmisor Óptico HFBR-1402...	101
--	-----

APENDICE D. Especificaciones de Operación del Receptor Óptico HFBR-2404.....	101
--	-----

CAPITULO 1

Proyecto de Fibra Óptica

1.1 Introducción

Las comunicaciones por fibra óptica son ampliamente utilizadas para comunicación de corta o larga distancia, ya que una ventaja de este tipo de comunicación es la gran distancia que puede recorrer una señal antes de necesitar un repetidor. En las últimas décadas debido a las características mencionadas se han desarrollado sistemas de comunicación altamente confiables, con bajas pérdidas y con capacidades de transmitir grandes cantidades de información. Las transmisiones por fibra óptica son un modelo que permite satisfacer las nuevas y crecientes necesidades de capacidad de transmisión y seguridad demandadas por las empresas en sus transmisiones de señales.

Las principales desventajas de otros sistemas de comunicación respecto a las comunicaciones por fibra óptica son:

- Transmisión por conductores metálicos o coaxiales, los cuales presentan gran sensibilidad a ser afectados por campos electromagnéticos que puede significar distorsión, atenuación o hasta la pérdida de la información.
- Ondas hertzianas, sus principales limitaciones es debido a las condiciones atmosféricas, las distancias recorridas y a la cantidad de información.

Por lo antes mencionado las cuales se presentan en: líneas de transmisión de potencia, maquinas eléctricas, subestaciones eléctricas y medio ambiente; por esto se requiere el sistema de comunicación por fibra óptica, ya que es altamente confiable ante estas condiciones.

Entre las principales ventajas de un sistema de comunicación por fibra óptica sobre la comunicación de ondas hertzianas y la comunicación por cables eléctricos, se mencionan las siguientes:

- Inmunidad a campos electromagnéticos
- Menor peso
- Ancho de banda mayor
- Bajas pérdidas en la transmisión
- Aislamiento eléctrico

- Menor tamaño
- Transmisión de varias señales sobre el mismo canal

En el presente trabajo se demuestra las grandes ventajas, detallando cada uno de los elementos que componen la modulación de la señal a transmitir, mezclador, transmisor y receptor óptico, fibra óptica, filtros y demodulación de la señal transmitida.

1.2 Objetivo

El objetivo del presente proyecto de tesis es la transmisión múltiple de señales analógicas por una sola fibra óptica, que permite que este sistema de comunicación sea recomendable en instalaciones donde exista interferencia electromagnética a fin de que esta interferencia no afecte las señales a transmitir por el uso de la fibra óptica.

1.3 Estructura de la Tesis

En esta sección, se describe brevemente cada uno de los capítulos que forman parte de este proyecto de tesis.

En el capítulo 1 se da una breve descripción de la transmisión por fibra óptica, así como el objetivo y descripción de la tesis desarrollada.

En el capítulo 2, se analiza la comparación de los canales clásicos de transmisión con la transmisión a través de la fibra óptica, con el fin de hacer notar las grandes diferencias que existen entre ellas. Además, se describe la propagación de luz en la fibra óptica, la apertura numérica, cono de aceptación, utilización de la reflexión total interna, tipos de fibra, tipos de fuente de luz (diodos emisores y láseres) y tipos de detectores (diodo PIN y avalancha).

En el capítulo 3, se determinan y describen cada uno de los componentes del transmisor y receptor, los cuales están integrados por el amplificador de instrumentación, generador de señales portadoras, multiplicador analógico, mezclador de señales, acoplamiento de la señal (convertidor voltaje-corriente y convertidor voltaje-

voltaje), transmisor óptico, receptor óptico, filtros pasa-banda, multiplicador analógico para la demodulación, filtro pasa bajas y el amplificador final.

En el capítulo 4, se diseña y construye el circuito implementado con el programa EAGLE, donde se muestra los circuitos esquemáticos y tarjetas de pistas de la sección de modulación, la sección de mezclado y transmisión y por ultimo la sección de la etapa de recepción para una y dos señales. Además, se muestran las señales de los resultados obtenidos al transmitir señales senoidales, cuadradas, dientes de sierra y voltajes de cd.

En el capítulo 5, se dan las conclusiones correspondientes al trabajo de tesis desarrollado.

Finalmente, se da la bibliografía y en los apéndices se encuentran las especificaciones de algunos dispositivos electrónicos utilizados.

CAPITULO 2

Antecedentes de Comunicación por Óptica

2.1 Canales Clásicos de Transmisión [1]

Un sistema de comunicaciones es más efectivo en la medida en que su canal de transmisión permita la propagación a grandes distancias de frecuencia elevada. Los parámetros de frecuencia y distancia no siempre son independientes.

Se recuerdan las características de los canales clásicos de transmisión, a fin de poder compararlos con las fibras ópticas.

2.1.1 Ondas Hertzianas

Las ondas electromagnéticas se pueden utilizar para transmitir información; a este tipo de transmisión se llama radio fusión. La información se introduce por medio de la modulación de onda. Las ondas hertzianas se produce cuando una corriente con una amplitud suficiente circula en una antena que tiene dimensiones iguales a la longitud de onda de la onda que se transmitirá. La trayectoria y la distancia recorrida por las ondas dependen de las condiciones atmosféricas y de la frecuencia de las ondas.

a) Bandas de frecuencias hectométricas y decamétricas.

Son reflejadas por la ionósfera que es la capa de partículas cargadas situada en la atmósfera terrestre superior. Las partículas que componen la ionósfera se producen por radiaciones procedentes del sol, si una onda hectométricas o decamétricas encuentra esta capa retornará rumbo a la tierra donde podrá captarse con una antena receptora. Sin embargo, como el sol perturba la ionosfera, la reflexión no será estable a lo largo del tiempo. Además, las frecuencias utilizadas no ayudan a la transmisión de una gran cantidad de información.

b) Bandas de frecuencia métrica y decimétrica.

Las ondas se propagan en línea recta, la transmisión sólo puede hacerse si no hay obstáculos sobre la trayectoria entre el emisor y receptor. La cantidad de información

puede ser elevada, pero el alcance de la transmisión es limitada porque el emisor y el receptor deben estar en línea de vista.

c) Microondas.

Son bandas de frecuencias superiores a los gigahertz. La longitud de onda disminuye con el aumento de la frecuencia lo que tiene ventajas y desventajas. La emisión puede ser muy directa lo que permite concentrar energía en una dirección mejor definida y de esta forma aumentar el alcance de la transmisión y evitar la interferencia de otros canales de transmisión. Si la frecuencia es muy elevada la cantidad de información transmitida puede ser muy grande. Sin embargo si la longitud de onda λ fuera muy pequeña, la interacción con los objetos que tienen dimensiones del orden de λ (difracción, difusión) sería muy grande. Por eso el efecto de las gotas de lluvia tiene una consecuencia muy negativa en la propagación de las microondas. Además, con estas altas frecuencias, las moléculas de oxígeno y de agua contenidas en el aire absorben las ondas electromagnéticas, lo que limita el alcance de la transmisión.

2.1.2 Cables Eléctricos

Se pueden utilizar cables para transportar información en forma de señales eléctricas, para frecuencias inferiores a 300 MHz.

Cable de audio: la atenuación de la señal eléctrica varía en función de la raíz cuadrada de la frecuencia. Esta atenuación es importante ya que limita la frecuencia máxima a 250 KHz, por lo tanto reduce la cantidad de información que se puede transmitir. También es notable su sensibilidad a las variaciones de temperatura y el hecho de que una señal eléctrica induce una señal parasita en el conductor vecino.

Cable coaxial: la atenuación de la señal eléctrica varía en función de la raíz cuadrada de la frecuencia. Está constituido por dos conductores concéntricos separados por un espacio lleno de aislante eléctrico, el conductor externo limita las perturbaciones eléctricas externas. Este tipo de cable rara vez se utiliza a más de 100 MHz.

Se observa que para el cable de audio y para el cable coaxial, a una gran distancia, implica baja frecuencia y a una alta frecuencia corresponde una corta distancia.

2.2 Canal de Transmisión Óptica

Entre más elevada sea la frecuencia de una onda electromagnética, mayor será la cantidad de información que se pueda transmitir. Esto justifica que se piense en utilizar frecuencias superiores a las de los microondas (en el área de infrarrojo y del espectro visible). La frecuencia promedio de la luz visible es en el orden de 3×10^{14} Hz, en donde existe un enorme potencial para transmitir información.

2.3 Reseña Histórica [4, 5, 6]

El primer intento en desarrollar el sistema de comunicación a través de fibra óptica fue hecho por Alexander Graham Bell, quién editó una patente en 1880 para un "Foto - Teléfono", que era un sistema para transmitir voz sobre distancias de algunos cientos de metros. El "Foto - Teléfono" estaba basado en la modulación de la luz del sol reflejada por un espejo que se hacía vibrar. El receptor era una fotocelda. A pesar que el aparato de Bell funcionó., el "Foto - Teléfono" no fue un éxito comercial. La invención del láser en 1960 ofreció una nueva oportunidad para comunicaciones ópticas. La búsqueda de un medio de transmisión adecuado hizo que los candidatos fueran líneas de mira entre dos telescopios, pero teóricamente no fueron útiles por sus altas pérdidas del orden de 100 dB/km.

La investigación de materiales para la transmisión óptica tuvo progresos dramáticos, las pérdidas fueron reducidas desde 100 dB/km a 20 dB/km en 1970 y 4 dB/km en 1973. Utilizando longitudes de onda mayores, las pérdidas fueron reducidas a 2 dB/km en 1974; 0.5 dB/km en 1976 y 0.2 dB/km en 1979. La investigación y desarrollo de láseres y fotodetectores también recibieron atención intensiva. El primer semiconductor láser fue anunciado en 1962.

Todo lo anterior dió lugar al primer sistema de teléfono comercial de larga distancia a través de fibra óptica, puesto en servicio por la American Telephone and Telegraph Company AT&T) en 1983.

2.4 Descripción General en un Sistema de Comunicación por Fibra Óptica [1]

En su forma más simple, un sistema de comunicación por fibra óptica está constituido por tres elementos, mostrada en la Figura 2.1:

- Modulo de emisión, tiene la función de transformar la información en forma de señal eléctrica a información en forma de luz.
- Canal de transmisión de la luz (fibra óptica).
- Modulo de recepción, tiene la función de transformar la información óptica recibida en información con la forma de señal eléctrica (receptor óptico).

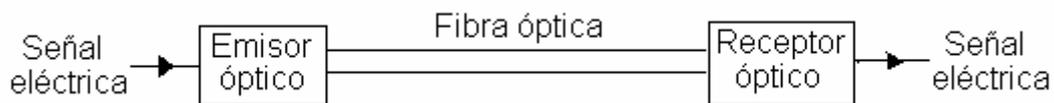


Figura 2.1. Sistema de comunicación por fibra óptica.

Las transmisiones a distancia demasiado grandes pueden necesitar uno o varios repetidores, cuya función es amplificar la señal óptica. Un repetidor está constituido por un receptor óptico seguido por un emisor óptico. El receptor y el emisor óptico están dotados de conectores que permiten acoplar la fuente y el receptor de la luz a la fibra. El canal de transmisión puede contener conectores que le permitan acoplar dos fibras entre sí.

2.4.1 Ventajas Potenciales [1, 2]

Con respecto a los sistemas tradicionales de comunicación, los sistemas por fibra óptica poseen cierto número de ventajas potenciales:

Aislamiento eléctrico.

Las fibras se hacen de materiales aislantes eléctricos (vidrios, plásticos) esto hace que la interferencia electromagnética externa no perturben la transmisión en la fibra. La transmisión será de muy alta calidad sin que se necesite una costosa protección contra el ruido electromagnético externo. Esto es una gran ventaja donde se producen variaciones bruscas de voltaje y corriente. Las fibras ópticas no sufren centelleos ni

cortocircuitos lo que las hace seguras en las fábricas de explosivos o de productos químicos y petroquímicos.

Baja atenuación.

Gracias a la baja atenuación de las fibras se puede acrecentar la distancia entre repetidores en un sistema de comunicación por fibra óptica, así se disminuye el número de repetidores aumentando la confiabilidad del sistema.

Peso y dimensiones.

Un cable de fibra óptica es por lo menos diez veces más ligero y más compacto que un cable coaxial clásico, lo que permite economizar el transporte y la instalación de cables; constituye también una ventaja clara para la instalación en aviones, barcos y en cualquier lugar con espacio limitado.

Gran banda de paso.

La fibra óptica, gracias a su gran capacidad de banda pasante, permite remplazar varios canales de transmisión clásicos, lo que es un gran logro económico.

Diafonía.

Como la fibra óptica no radia ni capta radiación externa, esta completamente exenta de la diafonía, lo que proporciona una transmisión con buena calidad.

2.5 Propagación de la Luz en la Fibra Óptica [1]

La propagación de la luz en la fibra óptica puede analizarse mediante el empleo de las leyes de la óptica geométrica. Esta primera aproximación permite definir una característica importante de la fibra óptica: su apertura numérica.

2.5.1 Reflexión y Refracción de la Luz

La luz puede transmitirse, reflejarse o refractarse de la superficie de separación que existe de entre dos medios diferentes. A continuación se verán las principales propiedades de la reflexión y la refracción de la luz.

Leyes de reflexión.

Si la luz incide en un espejo, el ángulo de reflexión θ_r es igual al ángulo de incidencia θ_i . Los ángulos se midieron con respecto a la perpendicular a la superficie reflectora (AN), en el punto de incidencia A.

El rayo incidente R_i , el rayo reflejado R_r y la normal AN pertenecen a un mismo plano llamado plano de incidencia, Figura 2.2.

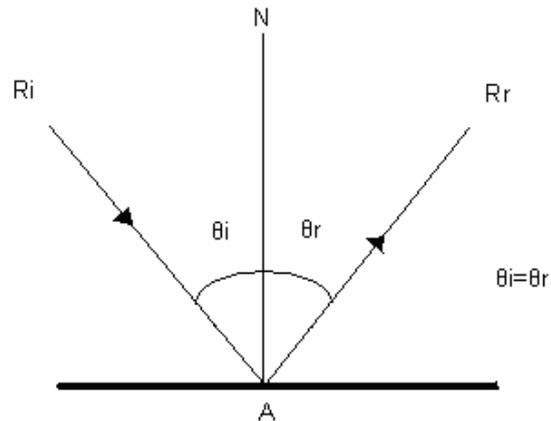


Figura 2.2. Reflexión de la luz.

Leyes de refracción.

En un medio dieléctrico (aislante eléctrico), la luz se propaga a una velocidad v menor, en comparación con la que alcanza en el vacío. La relación entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad en el dieléctrico se llama índice de refracción del dieléctrico. Este índice de refracción n es una característica específica del medio.

La luz se desvía ó refracta cuando atraviesa la interfaz de dos diferentes medios dieléctricos (cuyos índices son n_1 y n_2), Figura 2.3.

- El rayo incidente R_1 , el rayo refractario R_2 y la normal AN están en un mismo plano llamado plano de incidencia.
- La relación entre el seno del ángulo de incidencia θ_1 y el seno del ángulo de refracción θ_2 es constante y se define por:

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{ó} \quad n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2 \quad (2.1)$$

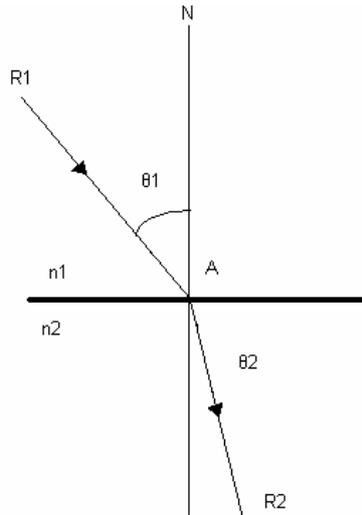


Figura 2.3. Refracción de la luz.

Consecuencias de las leyes de refracción.

Primer caso: $n_1 < n_2$.

La luz pasa de un medio a otro que tiene un índice mayor (por ejemplo del aire al vidrio), Figura 2.4.

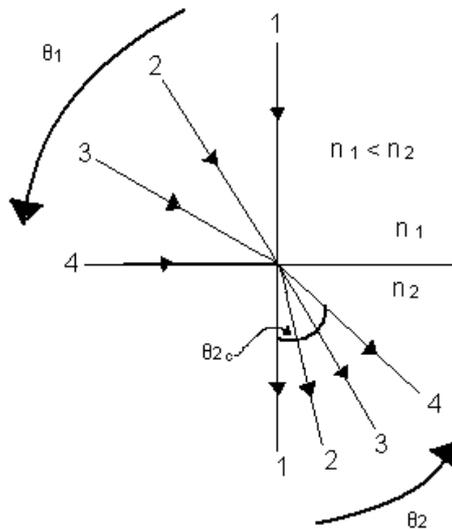


Figura 2.4. Ángulo crítico de refracción ($n_1 < n_2$), cuando θ_1 aumenta, θ_2 aumenta, pero no sobre pasa a θ_{2c} .

Se tiene:

$$\theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \text{sen } \theta_1 \tag{2.2}$$

En este caso existe un valor máximo del ángulo de refracción θ_{2c} , valor que corresponde a $\text{sen } \theta_1 = 1$ ($\theta_1 = 90^\circ$).

$$\theta_{2c} = \arcsen\left(\frac{n_1}{n_2}\right) \quad (2.3)$$

θ_{2c} se conoce como ángulo crítico de refracción.

Segundo caso: $n_1 > n_2$.

La luz pasa de un medio a otro que tiene un índice menor (del vidrio al aire), Figura 2.5.

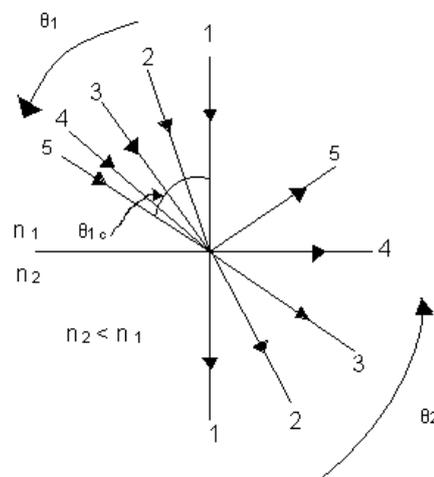


Figura 2.5. Reflexión total interna ($n_1 > n_2$). Cuando θ_1 es mayor que θ_{1c} , la luz se refleja totalmente.

$$\text{sen } \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \text{sen } \theta_1 \quad (2.4)$$

Como la función seno no puede ser mayor que 1 y la relación n_1/n_2 si lo es, entonces $\text{sen } \theta_1$ tiene como límite superior a $\text{sen } \theta_{1c}$.

$$1 = \frac{n_1}{n_2} \text{sen } \theta_1$$

$$\theta_{1c} = \arcsen\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (2.5)$$

Si $\theta_1 > \theta_{1c}$, la luz no se refracta, por el contrario, se refleja totalmente en el medio original cuyo índice es n_1 . θ_{1c} se conoce como ángulo crítico o ángulo mínimo de reflexión total interna. Se tendrá entonces una reflexión total interna, si la luz alcanza la interfaz ($n_1 > n_2$) con un ángulo superior al ángulo crítico.

Las nociones básicas de la refracción y la reflexión interna total son de ayuda para comprender la forma en que la luz puede propagarse en la fibra óptica.

2.5.2 Utilización de la Reflexión Total Interna

En la fibra de vidrio ($n=1.5$), cuando la luz alcanza la interfaz vidrio-aire con un ángulo mayor de 48.1° , se refleja totalmente hacia el interior de la fibra. De esta forma la luz podrá propagarse a lo largo de la fibra, gracias a una serie de reflexiones totales internas, como se muestra en Figura 2.6. Se señala que solo se propagará la luz que llegue a la interfaz con un ángulo mayor que 48.1° y que no todas las inclinaciones son adecuadas ($\theta > 42^\circ$), contrario a lo que sucede en la reflexión metálica.

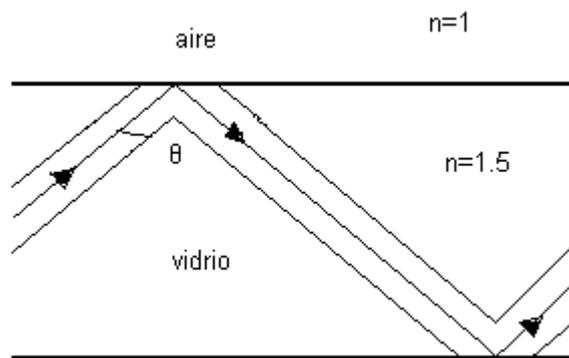


Figura 2.6. Propagación de la luz por medio de reflexiones totales internas.

La reflexión total interna se hace sin pérdidas; esta no ocasiona ninguna atenuación por lo que la reflexión total interna es la única que se toma en cuenta para la transmisión de larga distancia.

Como la reflexión total interna se produce en la interfaz entre el vidrio y el medio exterior, esta superficie debe definirse bien, no debe de tener ningún defecto. Si existe algún defecto en la interfaz tal vez esta condición no se cumpla, por lo que la luz puede refractarse fuera de la fibra y perderse, Figura 2.7.

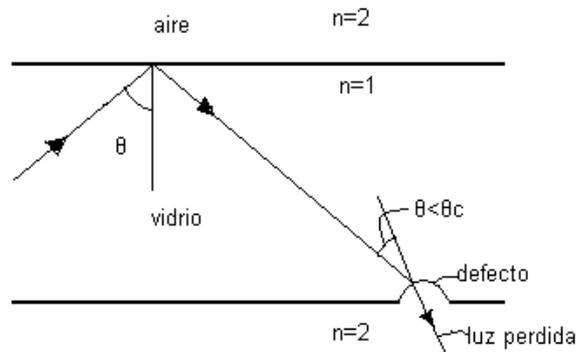


Figura 2.7. Refracción de la luz fuera de la fibra por algún defecto.

Para evitar esto, la fibra se envuelve con otro dieléctrico, así que esta se presenta ahora en forma de dos cilindros concéntricos; donde el cilindro interno, con índice n_1 , se llama núcleo de la fibra y, cilindro externo, con índice n_2 , se conoce como cubierta.

En la interfaz núcleo cubierta se producirá la reflexión total interna. Por lo que siempre es necesario que $n_1 > n_2$.

2.5.3 Cono de Aceptancia [1, 2]

Un rayo luminoso R, procedente de un índice n_0 (aire) penetra la fibra en el punto A; en este punto se refracta. En el punto B el rayo experimenta una reflexión total interna, tendrá otra reflexión total en C y así sucesivamente, como lo muestra la Figura 2.8. A continuación se verá cuales valores del ángulo de entrada α_0 puede ocurrir la propagación.

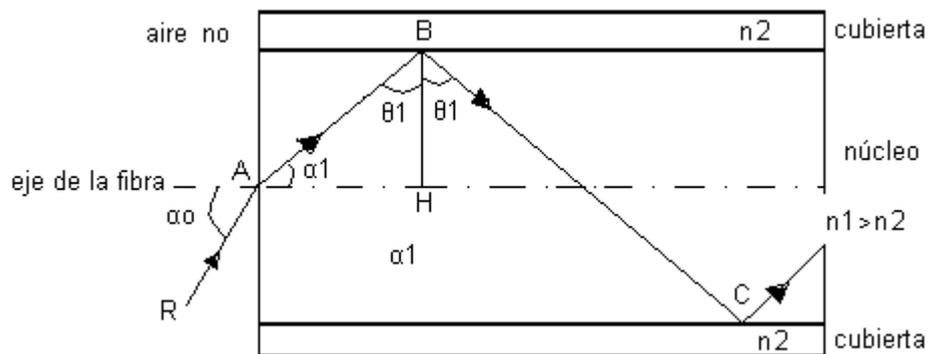


Figura 2.8. Corte longitudinal de una fibra óptica.

En el punto A, la ley de Snell señala:

$$n_0 \text{ sen } \alpha_0 = n_1 \text{ sen } \alpha_1 \quad (2.6)$$

Para la reflexión total en el punto B se debe tener:

$$\text{sen } \theta_1 \geq n_1 / n_2 \quad (2.7)$$

Como $\text{sen}^2 \theta_1 + \text{cos}^2 \theta_1 = 1$, la ecuación anterior puede escribirse de la siguiente forma:

$$\text{cos } \theta_1 \leq (1 - (n_1 / n_2)^2)^{1/2} \quad (2.8)$$

Como $\text{cos } \theta_1 = \text{sen } \alpha_1$, (2.6) puede escribirse:

$$n_0 \text{ sen } \alpha_0 = n_1 \text{ cos } \theta_1 \quad (2.9)$$

De (2.8) y (2.9):

$$\text{sen } \alpha_0 \leq (1 / n_0) (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (2.10)$$

La ecuación establece el valor máximo del ángulo de entrada α_0 para que la luz pueda reflejarse en B y propagarse a lo largo de la fibra.

El ángulo máximo de entrada α_{0M} está dado por:

$$\text{sen } \alpha_{0M} \leq (1 / n_0) (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (2.11)$$

Todo rayo luminoso que llegue a la cara de la entrada de la fibra óptica con un ángulo menor de α_{0M} será propagado. Esta luz está contenida en un cono, cuyo ángulo medio con vértice es α_{0M} , llamado cono de admisión o de aceptación, mostrado en la Figura 2.8.

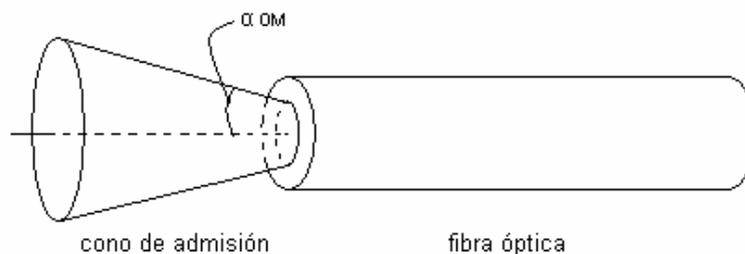


Figura 2.8. Cono de aceptación.

Si el medio que rodea a la fibra esta constituido por aire y sabiendo que $n_o = 1$; el ángulo máximo de entrada esta dado por:

$$\text{sen } \alpha_{oM} = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (2.12)$$

2.5.4 Apertura Numérica (NA) [1]

La apertura numérica es importante, ya que corresponde a la propiedad de la fibra para recolectar la luz y propagarla. Entre mas grande la magnitud de NA mayor es la cantidad de luz aceptada por la fibra de la fuente de la luz externa.

$$NA = \text{sen } \alpha_{oM} = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (2.13)$$

La apertura numérica depende de los índices de refracción del núcleo n_1 y de la cubierta n_2 , pero no de sus dimensiones. Si se pudieran escoger los índices, se podría aumentar NA, y por consecuencia aumentar la cantidad de luz que entra a la fibra, y por otra parte, se podría disminuir dimensiones.

2.5.5 Dispersión Modal

En una fibra óptica no todos los modos se propagan siguiendo las mismas trayectorias. Los modos de orden pequeño van prácticamente en línea recta, mientras que los de orden elevado reciben un gran número de reflexiones totales, así que tienen una trayectoria en zigzag. La diferencia de tiempo que tardan los diversos modos en recorrer una longitud dada de una fibra es la dispersión modal de la fibra.

2.5.6 Dispersión Cromática

Las fuentes de luz nunca son monocromáticas, la luz emitida por estas fuentes está constituida por la suma de ondas de diversas longitudes. El índice de refracción del material que forma a la fibra varía con la longitud de onda, lo que da como resultado una velocidad de propagación diferente para cada longitud de onda. Si se inyecta luz de diversas longitudes en una dirección dada, esta luz se propaga a diferentes velocidades según la longitud de onda; y si se descompone en función del tiempo, da como resultado un retardo entre las diferentes longitudes de onda en el extremo de la fibra, aun cuando se hayan inyectado en al mismo instante.

2.6. Tipos de Fibra Óptica [1, 2]

Esencialmente hay tres tipos de fibra óptica: Fibra de índice de escalón de modo sencillo, Fibra de índice escalón multimodo y Fibra de índice graduado multimodo.

2.6.1 Fibra de Índice Escalón de Modo Sencillo

Tiene un núcleo central suficientemente pequeño para que exista sólo una trayectoria que la luz pueda tomar, conforme se propague en el cable. En su modo sencillo de fibra de índice de escalón de modo sencillo, la cubierta exterior es simplemente aire, Figura 2.9. La gran diferencia de los índices refractivos, resulta en un ángulo crítico pequeño en la interface vidrio/aire, como consecuencia la fibra aceptará luz de una apertura ancha; sin embargo, este tipo de fibra es muy débil y de uso practico limitado.

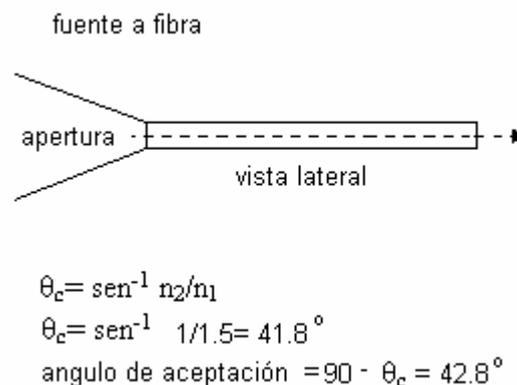


Figura 2.9. Fibra de índice escalón de modo sencillo con cubierta de aire.

Un tipo más practico es cuando esta misma tiene una cubierta que no sea el aire, donde el índice refractivo de la cubierta n_2 es un poco menor que la del núcleo central, y que es uniforme en toda la cubierta, Figura 2.10. El ángulo crítico es más alto y como consecuencia un ángulo de aceptación más pequeño y una apertura de fuente a fibra angosta, haciendo difícil acoplar la luz a la fibra desde de la fuente de luz.

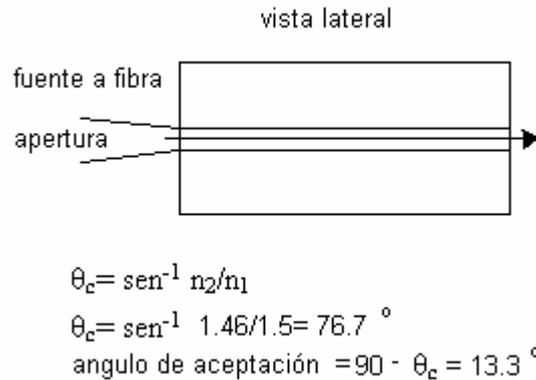


Figura 2.10. Fibra de índice escalón de modo sencillo con cubierta de vidrio.

Una de la ventaja de la fibra de índice de escalón de modo sencillo es que los rayos siguen aproximadamente la misma trayectoria por el cable y requieren aproximadamente el mismo tiempo para viajar la distancia del cable.

2.6.2 Fibra de Índice Escalón Multimodo

Es semejante al modo sencillo, a diferencia, de que el núcleo central es más grande, como se muestra en la Figura 2.11.

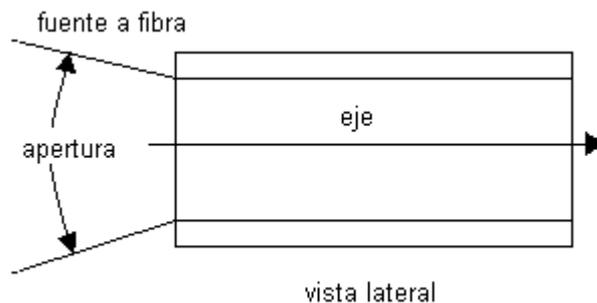


Figura 2.11. Fibra de índice escalón multimodo.

Este tipo de fibra tiene una apertura de luz a fibra más grande. Los rayos de luz que pegan en la interfaz núcleo/cubierta con un ángulo mayor que el ángulo crítico son propagados por el núcleo de manera zigzagueante y los rayos de luz que inciden en la interfaz núcleo/cubierta con ángulo menor que el ángulo crítico, entran a la cubierta y se pierden.

Se observa que hay muchas trayectorias que un rayo de luz puede seguir conforme se propaga en la fibra. Como resultado, no todos los rayos siguen la misma trayectoria y, en consecuencia, no requieren la misma cantidad de tiempo para viajar a la longitud de la fibra.

2.6.3 Fibra de Índice Graduado Multimodo [1]

La dispersión modal en fibra óptica típica como se había visto, se debe a la diferencia entre los tiempos de recorrido de los diferentes modos que se propagan en la fibra. Con el fin de igualar los tiempos de recorrido de los diferentes modos se utilizan fibras para las cuales los índices de refracción del núcleo n_1 no son los mismos en todo el núcleo, la Figura 2.12 muestra una fibra de índice graduado multimodo de cuatro escalones.

La fibra de índice graduado multimodo se caracteriza por un núcleo central que tiene un índice refractivo que no es uniforme, esta al máximo al centro y disminuye gradualmente hasta la orilla exterior. Se verá como la fibra de índice graduado puede reducir la dispersión modal. La luz se propaga en esta fibra por refracción. Supóngase que el índice del núcleo tiene cuatro saltos sucesivos igualmente espaciados para pasar de n_2 hacia el valor máximo de n_1 .

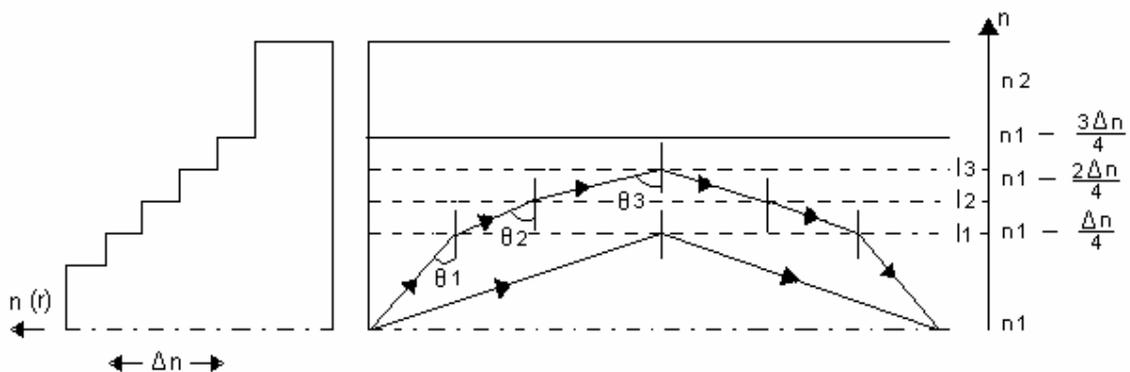


Figura 2.12. Fibra de índice graduado multimodo con cuatro escalones.

Un rayo de luz que parte del centro de la fibra y se dirige hacia la cubierta se encontrará con tres escalones en el valor del índice. La luz pasa de un índice elevado a un índice menor. Sobre la primera interfaz I_1 , la luz pasa de un medio con un índice n_1 a otro con índice $n_1 - (\Delta n/4)$ donde $\Delta n = n_1 - n_2$. Suponiendo que $\theta_1 < \theta_{1c}$, el rayo

luminoso se refracta y abandona I1 con un ángulo θ_2 más grande que θ_1 . El rayo alcanza la interfaz I2 con un ángulo θ_2 . Si $\theta_2 < \theta_{2c}$, refracta nuevamente. Enseguida se alcanza I3 con un ángulo θ_3 y, si θ_3 es muy grande se puede tener una reflexión total sobre I3, por la que el rayo se regresa hacia el centro de la fibra con refracciones inversas.

Si en lugar de tener cuatro saltos, se tiene diez saltos sucesivos, la diferencia entre los ángulos sucesivos serán más pequeños; y en lugar de formarse mediante variaciones de ángulos sucesivos y pequeños, es una curva continua.

El rayo 1 se propaga en el centro del núcleo a baja velocidad porque el índice refractivo es máximo en el centro. El rayo 2 recorre una distancia un poco más larga que el rayo 1, pero, su velocidad media es mayor, puesto que se propaga en una zona del núcleo en donde el índice es más pequeño que en el centro.

Los rayos de luz que viajan en el área más externa de la fibra viajan una distancia más grande que los rayos que viajan cerca del centro. Debido a que el índice refractivo disminuye con la distancia, desde el centro, y la velocidad es inversamente proporcional al índice refractivo, los rayos que viajan lo más lejos del centro se propagan a una velocidad mayor. Y en consecuencia, casi requieren la misma cantidad de tiempo para viajar por lo largo de la fibra, Figura 2.13.

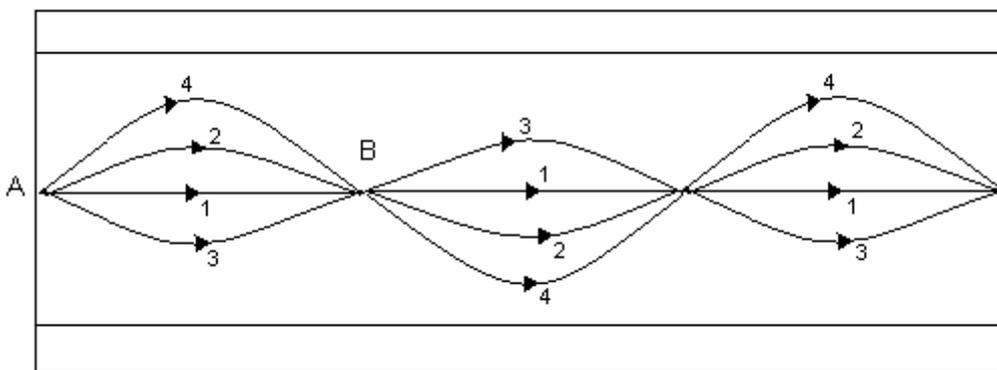


Figura 2.13. Fibra de índice graduado multimodo.

2.7 Fuentes de Luz [2]

Hay dos tipos usados usualmente para generar luz para sistemas de fibra por óptica: diodos emisores de luz (LED) y diodos de inyección láser.

Las características para la elección de la fuente de luz son:

1. Tener una superficie emisiva pequeña y si es posible, inferior a la superficie de entrada de la fibra.
2. Emitir la luz en direcciones compatibles con el cono de admisión o la apertura numérica de la fibra.
3. Emitir las longitudes de onda para que las fibras sean más transparentes, con el fin de recuperar la mayor cantidad de luz al final de la fibra.
4. Tener una longitud de onda espectral pequeña para minimizar la dispersión cromática.
5. Tener intensidad
6. Tener un tiempo rápido de respuesta.
7. Poder modularse con facilidad
8. Ser pequeña.
9. Ser económica

El led satisface principal mente los criterios 1, 3, 7, 8, 9 mientras que el láser satisface sobretodo los criterios 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8.

2.7.1 Diodos Emisores de Luz

Las estructuras del led más sencillas son dispositivos de heterounión, crecimiento epitaxial o difundidos sencillamente.

Los de crecimiento epitaxial generalmente están contruidos de arsenuro de galio dopado de silicio, Figura 2.14; la longitud de onda típica de luz emitida por esta construcción es de 940 nm y su potencia de salida típica es aproximadamente de 3 mW a 10 mA, Figura 2.14.

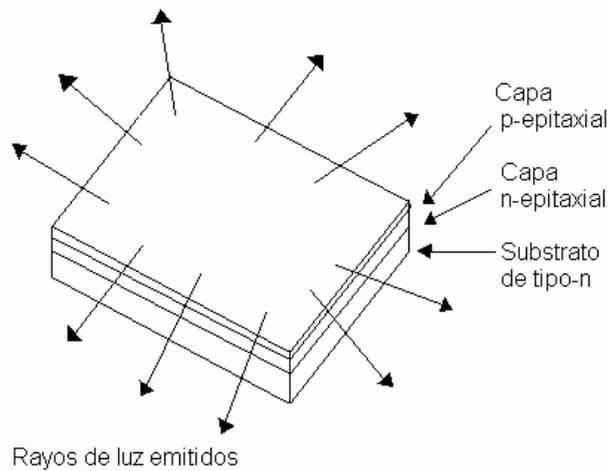


Figura 2.14. Led de crecimiento epitaxial.

Led de difusión planar (unión homóloga), Figura 2.15; produce $50 \mu\text{W}$ a una longitud de 900 nm . Su principal desventaja es la falta de direccionalidad de la emisión de luz, lo cual lo hace mala elección como fuente de luz para sistemas de fibra óptica.

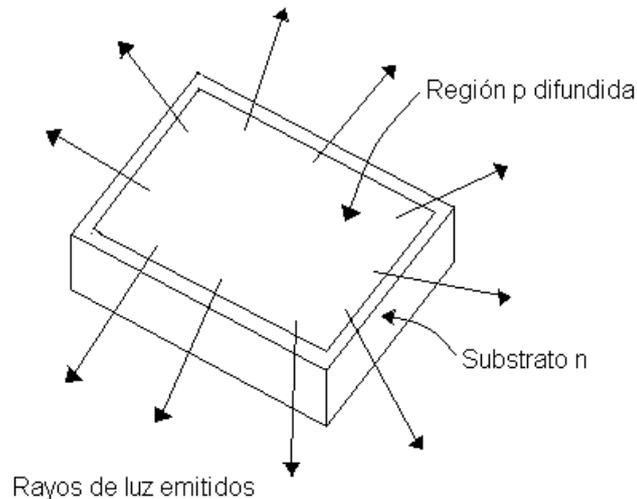


Figura 2.15. Led de difusión planar.

El led de heterounión planar, parecido al de crecimiento epitaxial, excepto que la geometría está diseñada para que la corriente se concentre en un área muy pequeña de la capa activa, Figura 2.16. Debido a esto tiene varias ventajas sobre el tipo de homounión:

- El aumento de la densidad de corriente genera un punto de luz más brillante.
- El área de emisión más pequeña facilita el acoplamiento de la luz a la fibra.
- El área más efectiva, más pequeña, tiene una capacitancia más pequeña, que permite que el led de heterounión planar se use en velocidades más altas.

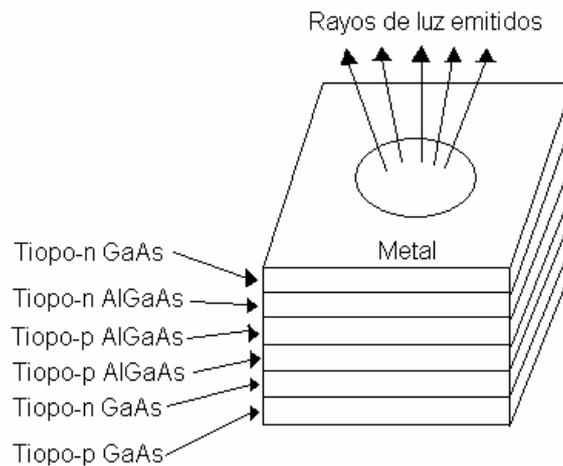


Figura 2.16. Led de heterounión planar.

2.7.1.1 Led de Emisión Superficial

El led emisor superficial emite luz en muchas direcciones. El estar bien grabado ayuda a concentrar la luz emitida en un área muy pequeña, como se muestra en la Figura 2.17. Además, pueden conectarse lentes en forma de domo sobre la superficie emisora para dirigir la luz a un área más pequeña. Estos dispositivos son más eficientes que los emisores superficiales estándar y permiten que mas potencia sea acoplada en la fibra óptica, pero son difíciles y costosos de fabricar.

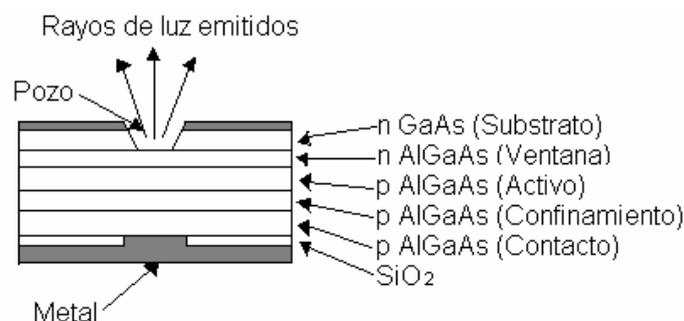


Figura 2.17. Led de emisión superficial.

2.7.1.2 Led Emisor de Orilla

Los led emiten un patrón de luz más direccional que los dos emisores superficiales. La luz se emite desde una tira activa y forma un rayo elíptico. Los led emisores superficiales son más comúnmente usados que los emisores de orilla porque emiten más luz. Sin embargo; las pérdidas por la conexión de los emisores superficiales son mayores y tienen un ancho de banda mas angosto.

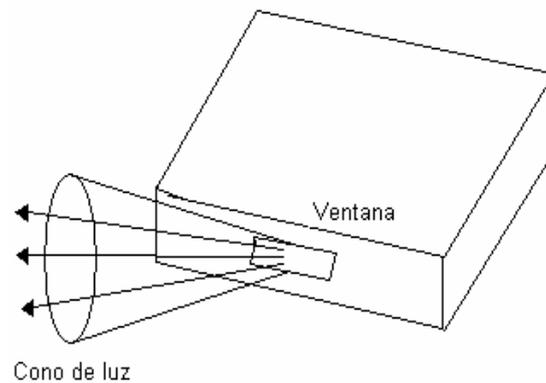


Figura 2.18. Led emisor de orilla.

La potencia de la luz radiante por un led esta en función lineal de la corriente directa pasando por el dispositivo. También que la potencia de salida óptica, es en parte, una función de la temperatura de operación, Figura 2.19.

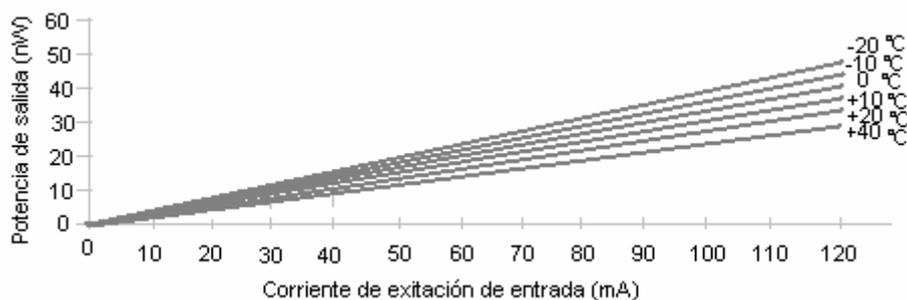


Figura 2.19. Potencia de salida contra corriente de entrada.

2.7.2. Tipos de Láseres [1,2]

Básicamente existen cuatro tipos de láseres:

- Láseres gaseosos. Utilizan una mezcla de helio y neón, encerrados en un tubo de vidrio. La salida de onda de luz continua es monocromática.
- Láseres líquidos. Utilizan pinturas orgánicas contenidas en tubo de vidrio para un medio activo. La pintura es circulada en el tubo con una bomba. Una pulsación de luz poderosa estimula a la pintura orgánica.
- Láseres sólidos. Utilizan un cristal sólido, cilíndrico para un medio activo. Cada punta del cilindro es pulida y paralela. El cilindro se excita por una lámpara de tungsteno, amarrado a una fuente de poder de corriente alterna. El resultado del láser es una onda continua.
- Láseres semiconductores. Están hechos de uniones p-n y comúnmente se les llama diodos de inyección láser (ILD). La luz de salida del ILD fácilmente se modula, haciéndola muy útil en muchas aplicaciones.

Los láseres semiconductores son emisores de radiación coherente, es decir, monocromática y muy directa. En los láseres de inyección, el efecto láser se produce por el paso de una corriente eléctrica.

La palabra láser significa: amplificación de la luz por emisión estimulada de radiación, lo cual indica que se mencionan las transiciones electrónicas entre dos niveles de energía de un átomo, considerando los niveles de energía E_1 y E_2 . Así mismo, el nivel E_1 está en estado normal o estable; y el nivel E_2 no está ocupado por un electrón. Si un fotón tiene la energía $E_2 - E_1$, cede esta energía al electrón que pasa al nivel E_2 y el fotón desaparece (fue absorbido). El átomo se encuentra en estado excitado.

2.7.2.1 Emisión Espontánea

El átomo excitado está en estado inestable. Este átomo tenderá a volver a su estado fundamental regresando al nivel E_1 que libera en forma de luz, la energía $E_2 - E_1$.

2.7.2.2 Emisión Estimulada

Si un fotón de energía $E_2 - E_1$ llega mientras el átomo está excitado, provoca el regreso del electrón al nivel E_1 y la emisión de un nuevo fotón. El fotón emitido se encuentra en fase con el fotón que lo provocó.

Hay amplificación de luz, puesto que a partir de un fotón se obtienen dos (efecto láser). En un semiconductor la transición en lugar de producirse entre niveles, se produce entre dos bandas; nivel fundamental que es la banda de valencia (normalmente llena) y nivel excitado que es la banda de conducción (normalmente vacía). Para que se produzca emisión estimulada, el semiconductor elegido debe ser de transición directa de banda. La emisión estimulada sólo se produce si hay más átomos en el estado excitado que en el estado fundamental. La transición se produce de la banda más llena a la más vacía; si la banda de valencia está más llena que la de conducción, un fotón provoca absorción; de lo contrario se provoca emisión estimulada.

La inversión de población es cuando la banda de conducción está más llena que la banda de valencia; esta inversión se realiza por la operación de bombeo que consiste en poner suficientes electrones en la banda de conducción.

Para que el efecto láser pueda producirse en el semiconductor es necesario:

- Producir una inversión de población;
- Disponer de una cavidad resonante para que haya amplificación.

La cavidad resonante sirve para amplificar ciertos modos a fin de obtener emisión monocromática. Si esta se encuentra constituida por dos espejos, se llama cavidad Fabry-Perót. Solo los fotones que se propagan y siguen la normal común a los espejos (eje resonante), pueden atravesar muchas veces el espacio comprendido entre los dos cristales. Si el medio en que se encuentra la cavidad hay inversión de población, los fotones generan fotones en fase en cada travesía (así se realiza la amplificación de la luz). La luz puede ser transmitida hacia el exterior si uno de los espejos es semitransparente siguiendo el eje de la cavidad resonante, dando como resultado una emisión muy directa.

En un láser semiconductor la inversión de población se produce por la inyección de corriente en una unión p-n. Dos caras opuestas del cristal puliéndolos se obtienen dos espejos semitransparentes. Las otras dos caras deben estar esmeriladas con el fin de que la cavidad sea activa únicamente en una sola dirección.

Sí la corriente es pequeña, hay emisión espontánea en todas direcciones; al aumento de corriente la inversión de población es suficiente y la ganancia de la cavidad es demasiado grande para que una onda pueda atravesarla sin atenuación; por lo tanto; existe una corriente umbral, para el cual se produce el efecto láser.

Debe haber cierta densidad de electrones ΔN en la banda de conducción para lograr el efecto láser. La densidad de corriente depende de la corriente I y del tiempo de recombinación τ . La densidad de corriente J_s necesaria para lograr el efecto láser está ligada a la densidad de electrones por la relación:

$$J_s = \frac{e d}{\tau} \Delta N \quad (2.14)$$

Donde:

e es la carga del electrón y

d es la zona de recombinación (zona activa).

La densidad de corriente es muy importante para hacer funcionar el láser y se puede disminuir actuando sobre d ; si se aumenta se alcanza una barrera de potencial al impedir a los electrones inyectados penetrar mucho en la región p; esto se le conoce como confinamiento electrónico. Con el fin de que la emisión estimulada sea más efectiva se añade el confinamiento óptico al confinamiento electrónico de tal forma que la región activa se comporte como una fibra óptica (que la luz se propague y solo salga por los extremos). El confinamiento electrónico y óptico se realizan en los láseres de heterounión, y el láser sin confinamiento se designa láser de homounión.

2.7.3 Principales Características de un Láser de Inyección [1]

Las principales características de un láser de inyección se enuncian a continuación:

2.7.3.1 Flujo energético emitido en función de la corriente

Cuando la corriente es inferior a la corriente umbral el láser funciona como un led, y cuando es superior a la corriente umbral el flujo emitido crece linealmente con la corriente, Figura 2.20.

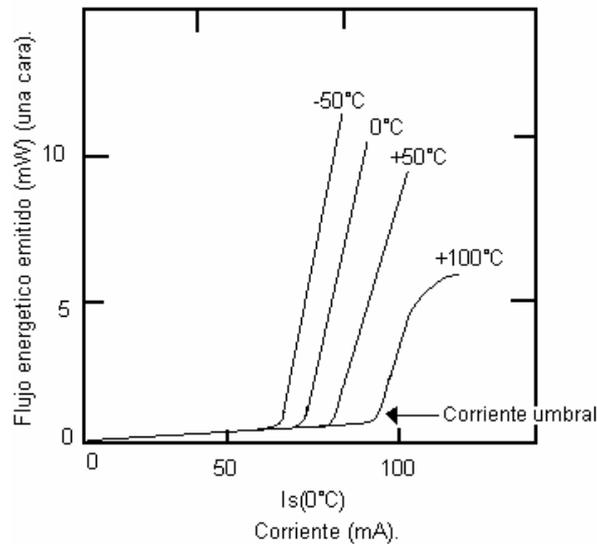


Figura 2.20. Potencia emitida en función de la corriente y la temperatura.

Para controlar flujo energético emitido es necesario controlar la temperatura o la corriente.

2.7.3.2 Diagrama de radiación

El diagrama de radiación depende de las dimensiones de la región emisora (espesor de la región activa y ancho de la cinta).

2.7.3.3 Modulación

Cuando se aplica un pulso de corriente a un láser de inyección, este no responde inmediatamente, debido al retraso entre la corriente y el flujo energético emitido; este retraso depende de la vida de los portadores inyectados.

2.7.3.4 Degradación

El láser de inyección se degrada con el tiempo, esta se manifiesta por el aumento de la corriente umbral y al disminución del rendimiento. Esta degradación de una alteración de los espejos por oxidación o por una potencia óptica demasiado grande.

2.8. Detectores de Luz [1, 2]

Un detector consiste en transformar la luz en una señal eléctrica y es la función inversa a la emisión, que consiste en transformar la señal eléctrica en luz. Una cualidad importante del detector es que debe ser capaz de proporcionar una señal eléctrica útil aun cuando reciba un flujo energético muy pequeño. La calidad fundamental del detector, por lo tanto, es su respuesta o sensibilidad.

Las características más importantes de los detectores de luz son:

2.8.1 Respuesta

Una medida de la eficiencia de conversión de un fotodetector. Es la relación de la corriente de salida de un fotodiodo a la potencia óptica de entrada y tiene la unidad en amperes/watts. La respuesta se da para una longitud de onda o frecuencia específica.

2.8.2 Corriente Oscura

La corriente de fuga que fluye por un fotodiodo sin entrada de luz. La corriente oscura será causada por los portadores generados térmicamente en el diodo.

2.8.3 Tiempo de Tránsito

El tiempo que requiere un portador inducido con luz para viajar a través de la región de agotamiento o vaciamiento. Este parámetro determina la máxima razón de bit posible con un fotodiodo específico.

2.8.4 Respuesta espectral

El rango de los valores de la longitud de onda que puede usarse para un fotodiodo específico. Generalmente, una respuesta espectral relativa se grafica como una función de la longitud de onda o de la frecuencia.

Hay dos dispositivos que se usan comúnmente para detectar la energía de la luz en los receptores de comunicación mediante fibra óptica: diodos PIN y fotodiodos de avalancha.

2.8.5 Diodo PIN [2]

Es comúnmente usado como detector de luz en los sistemas de comunicación de fibra óptica. Esta constituido por una capa ligeramente imperfecta (intrínseca) de material semiconductor tipo n , introducida entre la unión de las dos áreas de contacto tipo n y p fuertemente imperfecta, Figura 2.21. El material intrínseco esta lo suficientemente grueso para que la mayoría de los fotones que entren al dispositivo sean absorbidos. La mayoría de los fotones se absorben en los electrones en la banda de valencia del material intrínseco. Cuando los fotones son absorbidos, generan energía para generar portadores en la región de agotamiento o vaciamiento y permiten que la corriente fluya por el dispositivo.

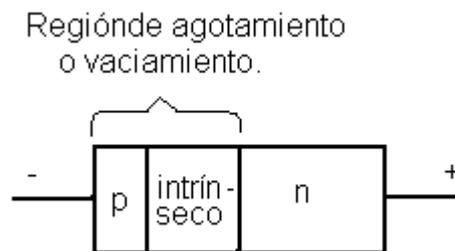


Figura 2.21. Diodo PIN.

2.8.6 Diodo de Avalancha

Es una estructura pin , Figura 2.22. La luz es absorbida por la delgada capa n fuertemente imperfecta. La alta intensidad de campo eléctrico generada por la unión $i-n$

p por una polarización inversa causa que ocurra una ionización de impacto; durante este proceso, una portadora puede ganar suficientemente energía para ionizar otros electrones. Las portadoras ionizadas, causan que ocurran más ionizaciones. El proceso continua como una avalancha, que equivale a una ganancia interna. La ventaja es que son más sensibles que los diodos PIN y que requieren de menos amplificación adicional. La desventaja es que genera internamente ruido debido a la avalancha y que los tiempos de transición son largos.



Figura 2.22. Diodo de avalancha.

CAPITULO 3

Transmisión por Fibra Óptica de un Conjunto de Señales

3.1 Comunicaciones

La comunicación se define como la transmisión de información de un lugar a otro, esta se hace entre un emisor y un receptor. La información se presenta bajo la forma de diversas señales que tiene un significado preciso. Las señales pueden tomar una forma particular cuyo sentido lo conocen el emisor y el receptor.

3.2 Componentes de un Enlace Mediante Fibra Óptica [4]

Los componentes de un enlace mediante fibra óptica se muestran en la Figura 3.1. Las secciones principales son tres, las cuales se describen a continuación:

- Transmisor: está constituido por un mezclador de señales, convertidor voltaje-corriente, convertidor voltaje-voltaje y una fuente de luz manejada por las dos anteriores.
- Medio de transmisión: consta de un cable de protección mecánica y ambiental a las fibras ópticas contenidas dentro.
- Receptor: consistente de un fotodetector, circuitos de amplificación y filtrado.

Componentes adicionales incluyen conectores ópticos, acopladores, repetidores y empalmes.

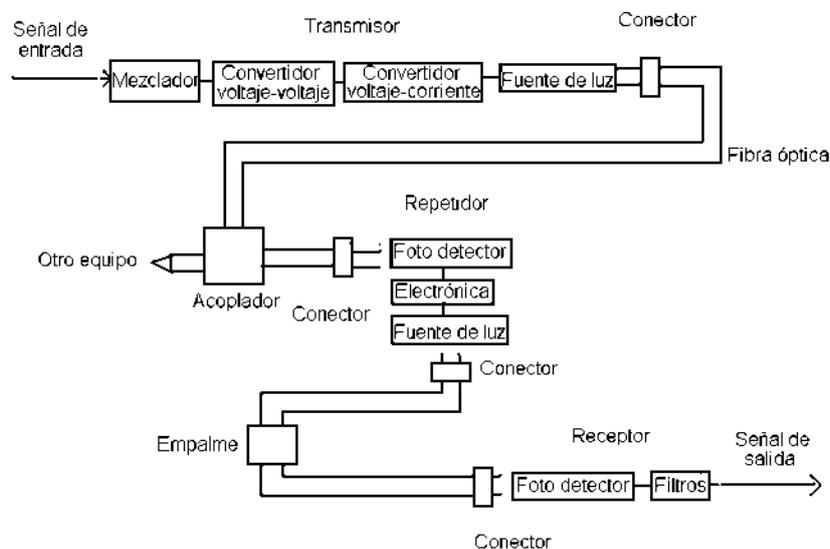


Figura 3.1. Componentes de enlace mediante fibra óptica.

3.3 Problemática de un Enlace con Múltiples Señales

Cuando transmitimos al mismo tiempo varias señales se le llama multiplex o señales multiplexadas. Evidentemente, se podría utilizar un sistema de transmisión para cada señal pero, esta solución tal vez no sea tan económica por lo tanto, se prefiere transmitir las diversas señales por el mismo canal de transmisión (en este caso la misma fibra óptica).

En la transmisión por fibra óptica no se puede modular la frecuencia de la luz como portadora, sólo se puede modular su amplitud.

3.4 Enlace por Fibra Óptica de Señales Multiplexadas en Frecuencia

Una técnica para transmitir al mismo tiempo sobre un mismo canal varias señales es la transmisión de señales multiplexadas en frecuencia, se muestra en la Figura 3.2. Si $\varepsilon_n(t)$, son n señales analógicas por transmitir en un ancho de banda, entonces el índice n permite distinguirlas. Cada señal $\varepsilon_n(t)$ modulada en amplitud a una señal de frecuencia f_n . Todas las señales moduladas con frecuencias diferentes son mezcladas en el multiplexor, dando como resultado, una señal compuesta a muy alta frecuencia; esta última, modula el flujo energético inyectado a la fibra.

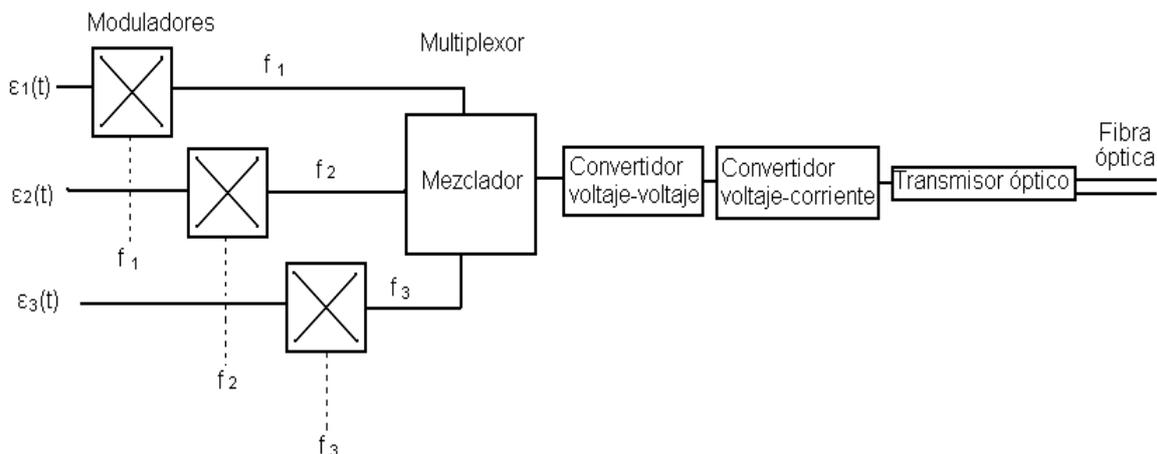


Figura 3.2. Señales multiplexadas en frecuencia.

3.5 Transmisor

Las señales de información deben ser transportadas entre un transmisor y un receptor sobre algún medio de transmisión. Sin embargo, las señales de comunicación pocas veces encuentran una forma adecuada para su transmisión, de modo que se necesita un proceso de modulación en amplitud, a fin de transformar la información, de su forma original, a una forma más adecuada para su transmisión.

3.5.1 Amplificador de Instrumentación [3]

El amplificador de instrumentación es uno de los amplificadores más útiles, precisos y versátiles en la actualidad. Algunas de las propiedades se mencionan a continuación.

- La resistencia de entrada de las dos entradas es muy alta y no cambia aunque se varíe la ganancia.
- El voltaje de salida, V_o , solo depende de la diferencia de los voltajes de entrada.
- Baja impedancia de salida, facilitando la conexión de una etapa posterior
- La ganancia puede ser precisamente ajustada, si la señal de entrada es pequeña en magnitud.

Se define la ganancia de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$\frac{V_o}{E_1 - E_2} = 1 + \frac{2}{a} \quad (3.1)$$

donde $a = aR/R$.

Si se elimina aR de manera que $aR = \infty$ la ganancia de voltaje de salida es igual a 1. El objetivo del amplificador de instrumentación del presente trabajo es proporcionar un voltaje de salida, cuando hay una señal de entrada referida a tierra o entrada diferencial. Además, se da la opción de tener una ganancia unitaria o variable; esto se puede lograr mediante la conexión de los pines X2-2 y X2-3 del circuito impreso. El amplificador de instrumentación se muestra en la Figura 3.3.

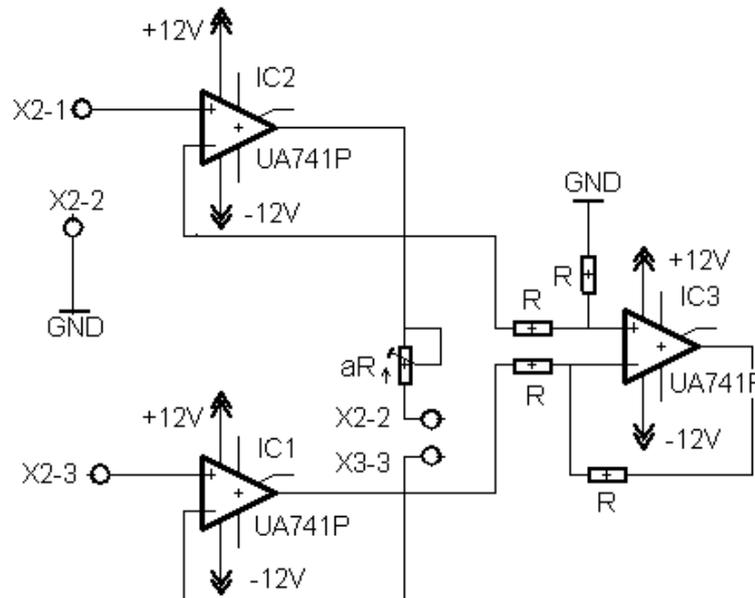


Figura 3.3. Amplificador de instrumentación implementado.

3.5.2 Generación de Señal Portadora

El ICL8038 es un circuito monolítico integrado capaz de producir una forma de onda sinusoidal, cuadrada y triangular con un mínimo de componentes externos. La frecuencia puede ser seleccionada externamente desde 0.001 Hz a más de 300kHz usando resistencias y capacitores; además, tiene una salida que es estable en un amplio rango de temperatura y variaciones de fuentes. La simetría de todas las formas de onda puede ser ajustada con la resistencia de tiempo externo. Un 50% del ciclo de trabajo es alcanzado cuando $R_a=R_b$. Si el ciclo de trabajo está variando por encima de un pequeño rango de alrededor del 50%, el potenciómetro de $1k\Omega$ puede ser utilizado para que el ciclo de trabajo sea del 50% en todo el dispositivo. Con dos resistencias de tiempo separadas la frecuencia está dada por:

$$f = \frac{0.33}{RC} \quad (3.2)$$

Si $R_a=R_b=R$.

Sin embargo, ni el tiempo ni la frecuencia son dependientes del voltaje de alimentación y ninguno de los voltajes es regulado dentro del circuito integrado.

En la Figura 3.4 se muestra el diagrama de terminales del ICL8038.

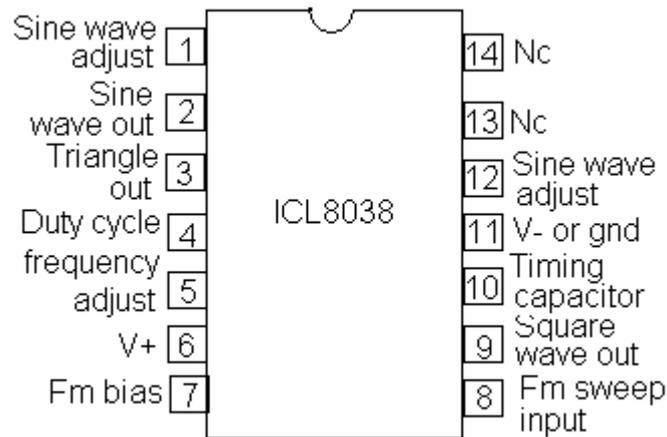


Figura 3.4. Diagrama de terminales.

Las especificaciones eléctricas de operación del ICL8038 se muestran en el apéndice A. Las frecuencias portadoras seleccionadas son de 800Hz, 10kHz y 15kHz, fueron generadas con la selección de los capacitores de 33nF, 3.3nF y dos de 4.7nF en serie (para lograr un valor de 2.35nF), respectivamente. Su conexión básica se muestra en Figura 3.5. Además, se muestra el circuito adicional para la selección de amplitud del voltaje y los valores correspondientes de cada componente.

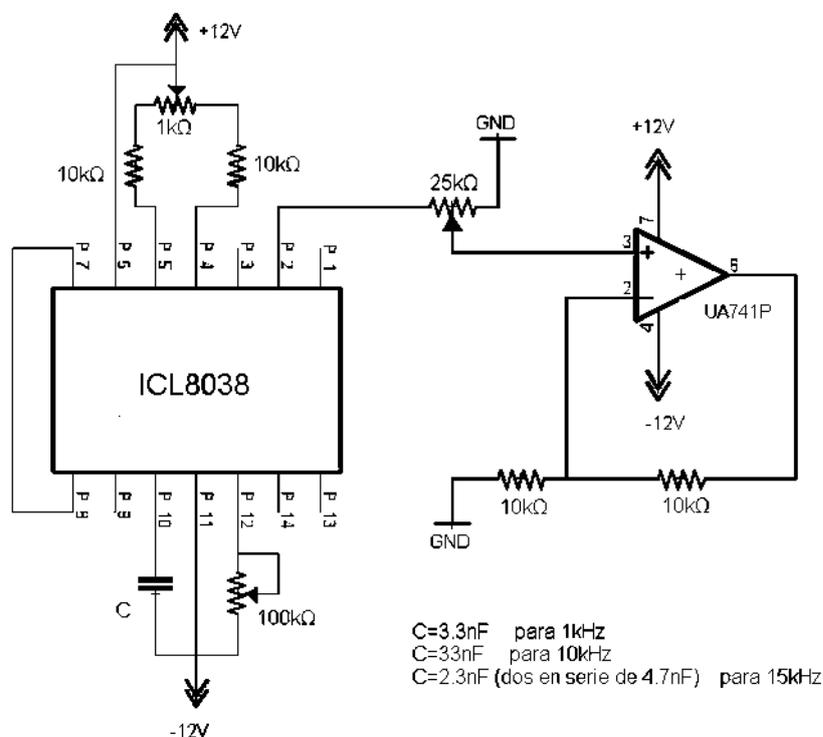


Figura 3.5. Conexión básica.

3.5.3 Modulación de Amplitud

La modulación de amplitud se define como el proceso de transformar información de su forma original a una forma más adecuada para la translación. La modulación de amplitud es cambiar la amplitud de una señal portadora de frecuencia relativamente alta de acuerdo con la amplitud la señal modulante (información). Con la modulación de amplitud, la información se imprime sobre la portadora en la forma de cambios de amplitud. Un modulador es un aparato no lineal con dos señales de entrada de información:

- Una señal portadora de amplitud constante y frecuencia sencilla.
- Señal de información.

La información actúa sobre o modula la portadora y puede ser una forma de onda de frecuencia simple o compleja compuesta de muchas frecuencias que fueron originadas de una o mas fuentes. Debido a que la información actúa sobre la portadora, se llama señal modulante.

Existen varias formas de modulación de amplitud; para este trabajo se consideró la portadora de AM de doble banda lateral (AM DSBFC). En la Figura 3.6 se muestra un modulador AM DSBFC simplificado que ilustra la relación entre la señal portadora $[V_c \text{ sen } (2\pi f_{ct})]$ y la señal de entrada (modulante) de la información $[V_m \text{ sen } (2\pi f_{mt})]$ y la onda modulada $[V_{am}(t)]$.

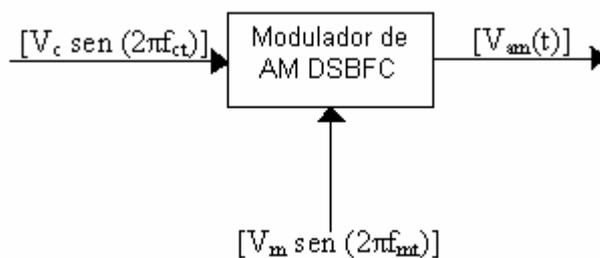


Figura 3.6. Modulador de AM DSBFC.

La Figura 3.7 muestra en el dominio del tiempo como se produce una onda AM a partir de la señal modulante de la frecuencia simple. La onda modulada contiene todas

las frecuencias que componen la señal AM y se utiliza para llevar la información a través del sistema. Por lo tanto, a la forma de onda modulada se le llama envolvente.

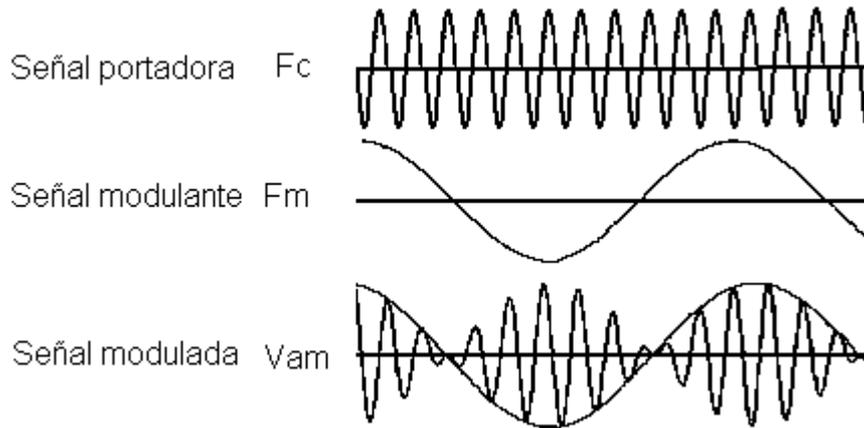


Figura 3.7. Forma de onda AM.

Cuando se aplica una señal modulante, la amplitud de la onda de salida varía de acuerdo a la señal modulante. La forma del envolvente AM es idéntica a la modulante. El tiempo de un ciclo del envolvente es el mismo que el periodo de la señal modulante.

Si la señal modulante es: $V_m(t) = A_m \cos \omega_m t$ (3.3)

y la señal portadora es: $V_c(t) = A_c \cos \omega_c t$ (3.4)

La señal modulada es: $V_{am} = V_c(t)V_m(t) = [A_m \cos \omega_m t][A_c \cos \omega_c t]$ (3.5)

Utilizando identidades trigonométricas, se tiene:

$$V_{am}(t) = \frac{A_c A_m}{2} [\cos(\omega_c + \omega_m)t + \cos(\omega_c - \omega_m)t] \quad (3.6)$$

Como un modulador AM es un dispositivo no lineal; ocurre un mezclado no lineal y la envolvente de salida es una onda compleja compuesta de un voltaje de cd, la frecuencia portadora y las frecuencias de la suma ($f_c + f_m$) y la diferencia ($f_c - f_m$). La suma y diferencia de frecuencias son desplazadas de la frecuencia portadora por una cantidad igual a la frecuencia de la señal modulante. Por lo tanto, la envolvente de AM contiene componentes de frecuencia espaciados por f_m Hz en cualquiera de los lados de la portadora. Sin embargo, la onda modulada no contiene una componente de frecuencia que sea igual a la frecuencia de la señal modulante. El efecto de la modulación es trasladar la señal de modulante del dominio de la frecuencia para reflejarse simétricamente alrededor la frecuencia del conducto.

La Figura 3.8 muestra el espectro de frecuencia para una onda AM que abarca desde $f_c - f_{m(\max)}$ a $f_c + f_{m(\max)}$, donde f_c es la frecuencia portadora y $f_{m(\max)}$ es la frecuencia modulante de señal más alta. La banda de frecuencias entre $f_c - f_{m(\max)}$ y f_c se llama banda lateral inferior (LSB) y cualquier frecuencia dentro de esta banda se llama frecuencia lateral inferior (LSF). La banda entre las frecuencias f_c y $f_c + f_{m(\max)}$ se llama banda lateral superior (USB) y cualquier frecuencia dentro de esta banda se llama frecuencia lateral superior (USF). Por lo tanto el ancho de banda (B) de una onda AM DSBFC es igual a la diferencia entre la frecuencia lateral superior mas alta y la frecuencia lateral inferior más baja o dos veces la frecuencia de la señal modulante mas alta es decir, $B = 2f_{m(\max)}$.

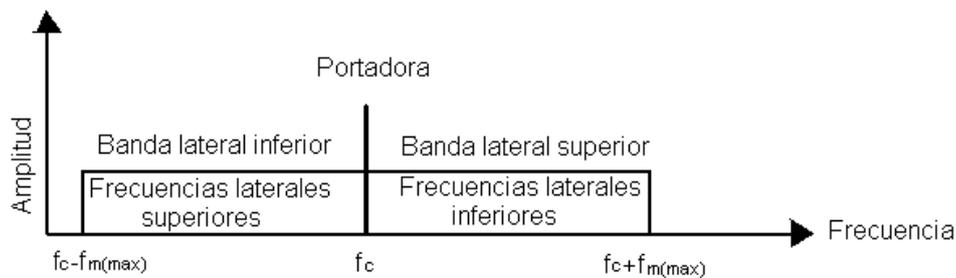
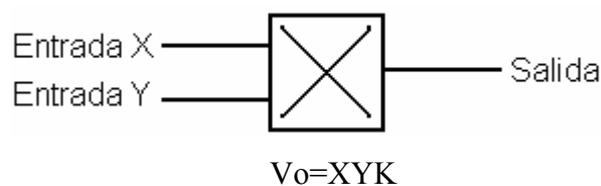


Figura 3.8. Espectro de frecuencia de una onda AM DSBFC.

3.5.4 Multiplicador de Señales

Un multiplicador de señales realiza el proceso de modulación y demodulación. Dispositivo de multiplicación analógica de señales, el cual permite que una señal pueda ser modulada o montada en una señal portadora de alta frecuencia o de lo contrario, el que permite la demodulación.

El esquema general de un multiplicador se muestra en la Figura 3.9, el voltaje de salida V_o es el producto de los voltajes de entrada X y Y.



$$V_o = XYK \quad (3.7)$$

Figura 3.9. Esquema general de un multiplicador analógico de señales.

La constante K se denomina factor de escala y, por lo común, es igual $1/10$ V. Esto se debe a que los multiplicadores están diseñados para el mismo tipo de suministro de energía que se utiliza para los amplificadores operacionales, (15V). Para mejores resultados, los voltajes aplicados, ya sea a las entradas X o Y, no deben exceder 10V con respecto a tierra. Este límite de 10V también se aplica a la salida, de modo que el factor de escala, por lo general, es el recíproco del límite de voltaje o $1/10$ V. Si ambos voltajes de entrada están en sus límites positivos de +10V, la salida estará al límite positivo de 10V. Por lo tanto, la ecuación para la mayoría de los multiplicadores está dada por:

$$V = (XY)/10 \quad (3.8)$$

Los multiplicadores se tienen de primer, segundo o cuarto cuadrantes, teniéndose éstos en base a la posible polaridad de los voltajes de entrada, la Figura 3.10 lo muestra.

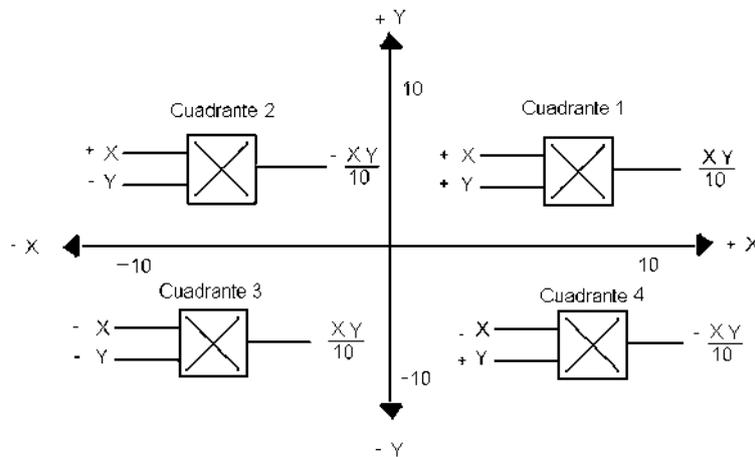


Figura 3.10. Representación de los cuadrantes en un multiplicador analógico.

Se seleccionó el circuito AD534J, el cual es altamente estable, preciso y prácticamente no requiere calibración. Cualquier desbalance interno es eliminado con precisión mediante un ajuste fino por el fabricante, utilizando láseres controlados por computadora para la fabricación de los elementos internos.

El circuito AD534J es un multiplicador analógico de cuatro cuadrantes de alta exactitud y propósito general que acepta entradas y salidas diferenciales. En la Figura 3.11 se presenta el diagrama de las terminales de este circuito.

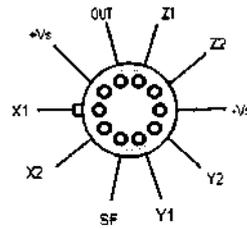


Figura 3.11. Diagrama de terminales del AD534J.

Las características de operación del circuito multiplicador AD534J, se muestran en la tabla 3.1, así como las especificaciones eléctricas en el Apéndice B.

PARAMETRO	AD534J
Voltaje de suministro de potencia	18V
Disipación de potencia	500mW
Voltajes de entrada X,Y, y Z	$\pm V_s$
Rango de temperatura de operación	0°C a + 70°C
Rango de temperatura de almacenamiento	-65°C a 150°C
Temperatura de almacenamiento	300°C

Tabla 3.1. Características máximas absolutas.

En la Figura 3.12 se muestra la conexión básica del circuito AD534J como multiplicador de voltaje.

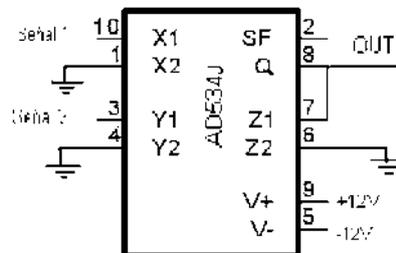


Figura 3.12. Conexión básica del circuito AD534J.

3.5.5 Mezclador de Señales [2]

El mezclado es el proceso de combinar dos o más señales. En el presente trabajo se requiere transmitir tres señales moduladas en amplitud a través de la fibra óptica. Es necesaria una suma lineal, esta ocurre cuando dos o más señales se mezclan en un dispositivo lineal, tal como, un amplificador de señal pequeña. De manera, que cuando ocurre el mezclado no se generen nuevas frecuencias y la forma de onda resultante sea simplemente la suma lineal de las señales individuales.

Se describe matemáticamente el mezclado de tres señales:

$$V_{am1} = V_a \text{ sen} 2\pi f_a t \quad (3.9)$$

$$V_{am2} = V_b \text{ sen} 2\pi f_b t \quad (3.10)$$

$$V_{am3} = V_c \text{ sen} 2\pi f_c t \quad (3.11)$$

La señal de salida es:

$$V_{sal} = A (V_{am1} + V_{am2} + V_{am3}) \quad (3.12)$$

$$V_{sal} = AV_a \text{ sen} 2\pi f_a t + AV_b \text{ sen} 2\pi f_b t + AV_c \text{ sen} 2\pi f_c t \quad (3.13)$$

En la Figura 3.13 se muestra el circuito que se ajusta adecuadamente para mezclar las tres señales moduladas.

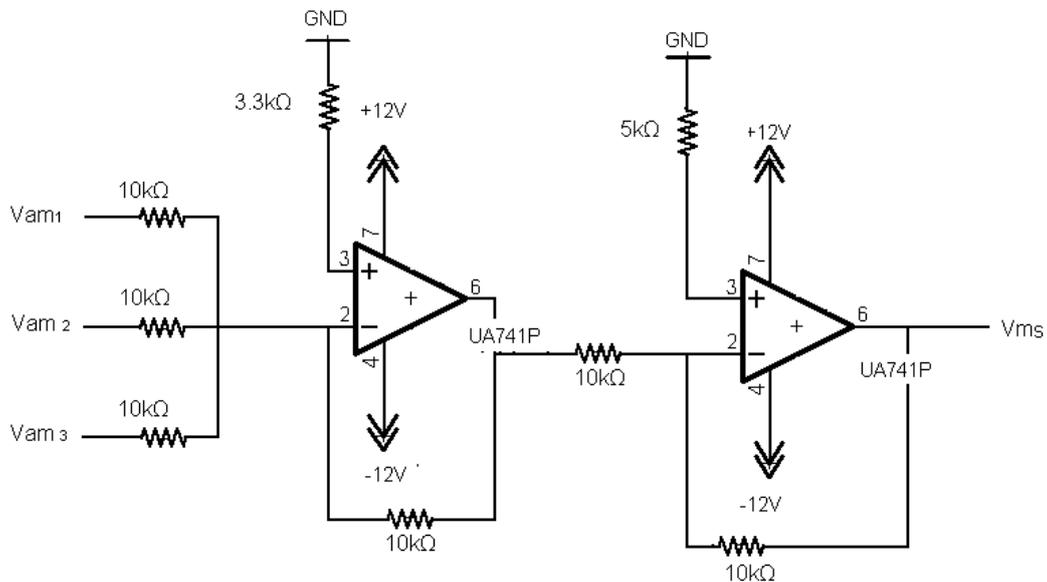


Figura 3.13. Mezclador de señales.

Las señales moduladas son:

$$V_{am1} = \{A_{m1} \text{ sen} [2\pi (f_{m1})] t\} \{10 \text{ sen} [2\pi (800 \text{ Hz})] t\} \quad (3.14)$$

$$V_{am2} = \{A_{m2} \text{ sen} [2\pi (f_{m2})] t\} \{10 \text{ sen} [2\pi (10 \text{ kHz})] t\} \quad (3.15)$$

$$V_{am3} = \{A_{m3} \text{ sen} [2\pi (f_{m3})] t\} \{10 \text{ sen} [2\pi (15 \text{ kHz})] t\} \quad (3.16)$$

La ganancia del circuito de la Figura 3.13 es uno; la señal de salida es:

$$V_{ms} = V_{am1} + V_{am2} + V_{am3} \quad (3.17)$$

$$V_{ms} = \{A_{m1} \text{ sen}[2\pi(f_{m1})]t\} \{10 \text{ sen} [2\pi (800 \text{ Hz})] t\} + \\ \{A_{m2} \text{ sen}[2\pi(f_{m2})]t\} \{10 \text{ sen} [2\pi (10 \text{ kHz})] t\} + \\ \{A_{m3} \text{ sen}[2\pi(f_{m3})]t\} \{10 \text{ sen} [2\pi (15 \text{ kHz})] t\} \quad (3.18)$$

V_{ms} es una forma de onda compleja que contiene las tres señales moduladas, siendo igual a la suma algebraica de V_{am1} , V_{am2} y V_{am3} .

3.5.6 Convertidor Voltaje-Voltaje [7]

El propósito del convertidor voltaje-voltaje es cambiar el voltaje máximo y mínimo que proviene del mezclador de señales a un rango de voltaje más fácil de manejar para transmitir la señal en la fibra óptica. Se tiene un voltaje de salida del mezclador de -5 a $+5$ V y se cambió a un voltaje de 0 a 5 V por medio del circuito que se muestra en la Figura 3.14.

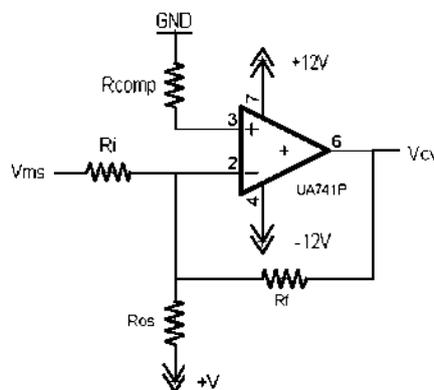


Figura 3.14. Convertidor voltaje-voltaje.

Por superposición, se tiene:

$$V_{cv} = -\frac{R_f}{R_i} V_{ms} - \frac{R_f}{R_{os}} V \quad (3.19)$$

La ecuación (3.18) representa la ecuación de una línea recta con pendiente m :

$$m = \frac{\Delta V_{cv}}{\Delta V_{ms}} = \frac{R_f}{R_i} \quad (3.20)$$

Y su ordenada en el origen b , esta dada por:

$$b = \frac{R_f}{R_{os}} V \quad (3.21)$$

Para determinar los parámetros del circuito se tiene:

$$m = \frac{V_{cv}(\max) - V_{cv}(\min)}{V_{ms}(\max) - V_{ms}(\min)} \quad (3.22)$$

Sustituyendo los valores máximos y mínimos:

$$m = \frac{5 - 0}{5 + 5} = 0.5 \quad (3.23)$$

Seleccionando $R_f = 10\text{k}\Omega$:

$$R_i = \frac{10k\Omega}{0.5} = 20k\Omega \quad (3.24)$$

Para calcular R_{os} se tiene:

$$b = V_{cv} - m V_{ms} \quad \text{ó} \quad b = V_{cv}(\text{min}) - m V_{ms}(\text{min}) \quad (3.25)$$

Se sustituyen los valores de la condición $V_{cv}=0V$,

$$b = 0 - (0.5)(-5) = 2.5 \text{ V} \quad (3.26)$$

Seleccionando $V=12V$, que es la polarización positiva de amplificadores operacionales.

$$R_{os} = \frac{R_f}{b} V \quad (3.27)$$

$$R_{os} = \frac{(10k\Omega)(12 \text{ V})}{(2.5)} = 48 k\Omega \quad (3.28)$$

La R_{com} se calcula por el paralelo de las resistencias, dando un valor de:

$$R_{com} = 5k\Omega \quad (3.29)$$

La ecuación para el ajuste del rango es:

$$V_{cv} = -(0.5 V_{ms} + 2.5) \quad (3.30)$$

Su representación gráfica se muestra en la Figura 3.15. sin considerar el signo negativo de la ecuación (3.30).

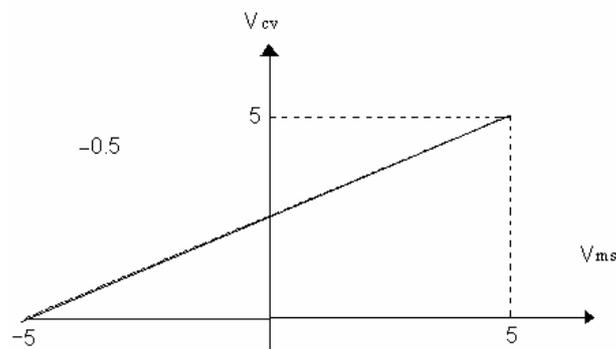


Figura 3.15. Grafica del convertidor voltaje-voltaje.

3.5.7 Convertidor Voltaje-Corriente [7]

La transmisión de señales de voltaje presenta muchos problemas. La resistencia serie entre la salida del acondicionador de la señal y la carga depende de la distancia, el cable utilizado, la temperatura, y también de la perfección de las conexiones. Unos pocos milivolts de caída de tensión a través de esta resistencia serie, podrían alterar significativamente el porcentaje de error de la medición. La corriente, sin embargo, es la

misma en transmisión serie. Convirtiendo la señal a corriente y transmitiendo esa corriente se asegura que toda la carga tendrá esa señal a consumir.

La transmisión de señales a través de fibra óptica requiere del uso de un transmisor, para la conversión de energía eléctrica en energía luminosa. El transmisor es básicamente un fotodiodo que requiere una corriente eléctrica para su funcionamiento. Por lo tanto, el convertidor de voltaje a corriente es un elemento indispensable para la transmisión de señales por fibra óptica. El convertidor de voltaje a corriente implementado se muestra en la Figura 3.16.

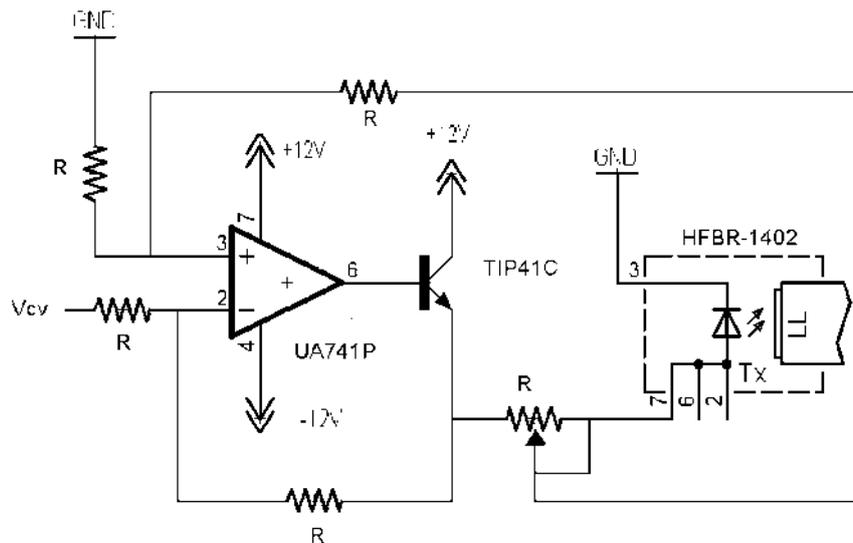


Figura 3.16. Convertidor voltaje-corriente.

Para analizar el convertidor se analiza el circuito que se muestra en la Figura 3.17.

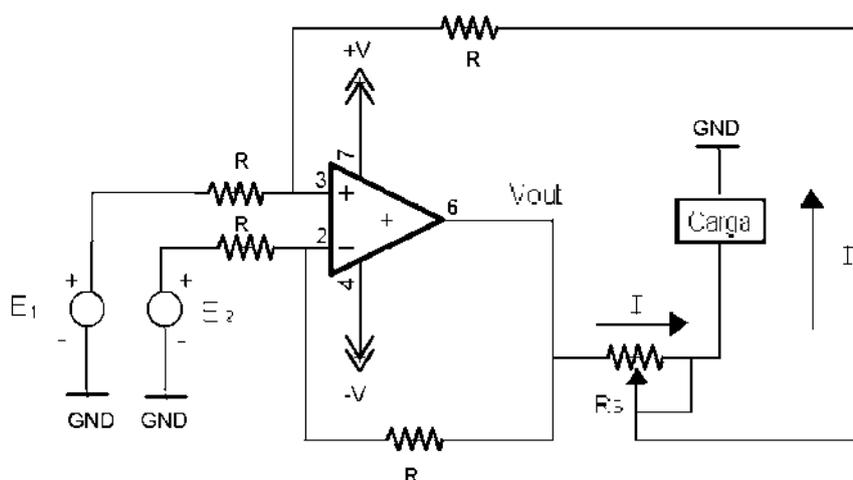


Figura 3.17. Circuito equivalente del convertidor voltaje-corriente.

Obteniendo el circuito equivalente para analizarlo por superposición, Figura 3.18:

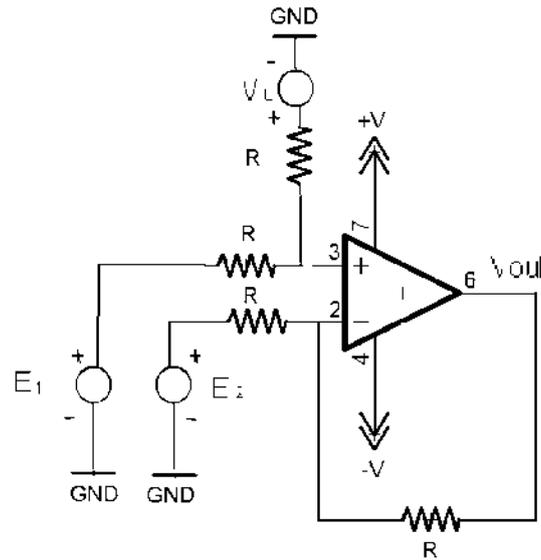


Figura 3.18. Circuito convertidor para análisis por superposición.

Aplicando el principio de superposición en la Figura 3.18 se tiene:

$$\text{Con } E_2=0 \text{ y } V_L=0, V_{\text{out}1} = E_1 \quad (3.31)$$

$$\text{Con } E_1=0 \text{ y } V_L=0, V_{\text{out}2} = -E_2 \quad (3.32)$$

$$\text{Con } E_1=0 \text{ y } E_2=0, V_{\text{out}3} = V_L \quad (3.33)$$

$$\text{El voltaje de salida es: } V_{\text{out}} = V_{\text{out}1} + V_{\text{out}2} + V_{\text{out}3} \quad (3.34)$$

$$\text{Sustituyendo (3.31), (3.32) y (3.33) en (3.34) se tiene: } V_{\text{out}} = V_L - E_2 + E_1 \quad (3.35)$$

$$\text{El voltaje a través de la resistencia es: } V_{R_s} = V_{\text{out}} - V_L \quad (3.36)$$

$$\text{Sustituyendo (3.35) en (3.36): } V_{R_s} = V_L - E_2 + E_1 - V_L \quad (3.37)$$

$$\text{Reduciendo, } V_{R_s} = -E_2 + E_1 \quad (3.38)$$

$$\text{La corriente a través de } R_s \text{ es: } I_{R_s} = V_{R_s} / R_s \quad (3.39)$$

$$\text{Sustituyendo (3.38) en (3.39): } I_L \approx I_{R_s} \approx (E_1 - E_2) / R_s \quad (3.40)$$

La corriente que fluye a través del transmisor esta determinada por la diferencia entre E_1 y E_2 , así como el valor de la resistencia R_s .

$$\text{Como } E_1=0 \text{ y } E_2=V_{\text{cv}}, \text{ reduciendo la ecuación (3.40) a: } I_L \approx V_{\text{cv}} / R_s \quad (3.41)$$

Las especificaciones del HFBR-1402, las cuales se describen en la sección 3.4.1.8, el rango de corriente del transmisor es de 0 a 60mA. Como el voltaje de entrada al convertidor de voltaje-corriente es de 0 a 5V, la resistencia R_s tendrá un valor de:

$$R_s = 5V / 60\text{mA} = 83.33\Omega$$

En la Figura 3.19 se muestra la respuesta del convertidor, lo cual demuestra que es lineal.

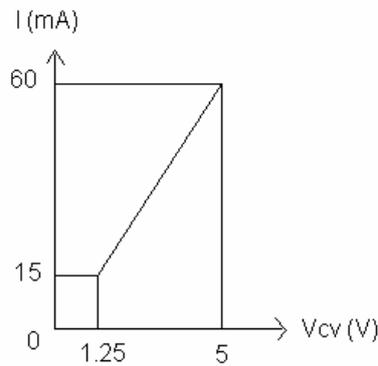


Figura 3.19. Respuesta del convertidor voltaje-corriente.

Se hace notar, que la salida del convertido voltaje-corriente queda como lo muestra la Figura 3.19, aunque la entrada al convertidor sea en la entrada inversora; esto es debido a que la salida del convertidor voltaje-voltaje viene invertida.

El transistor seleccionado fue el TIP41C, debido a que el voltaje de colector puede ser conectado directamente al voltaje polarización del amplificador operacional. Debido a las especificaciones del transmisor óptico que se proporcionan en el apéndice C, el voltaje en directa del transmisor es de 1.1V para una corriente de 10mA, lo cual determina el rango de voltaje de salida del circuito mezclador, que es de -2.5 a +2.5V y, por lo tanto, establece el rango de voltaje de las señales a transmitir, el cual es de 1V_{pp} a 5V_{pp}.

Así, el rango de voltaje de salida del circuito mezclador cambiara a un rango de 1.25 a 3.75V, lo que causara que el rango real de salida del convertidor voltaje-corriente será de 15mA a 52.5mA, por lo tanto, se garantiza que el transmisor opere en un rango seguro de corriente de entrada.

3.6 Transmisor Óptico [8]

El transmisor óptico seleccionado para la construcción del sistema es del tipo HFBR-1402, capaz de emitir eficientemente en una longitud de onda de 820nm para los siguientes tamaños de fibras: 50/125μm 62.5/125μm y 1.00/140μm. Esta diseñado para operar con el receptor de fibra óptica HFBR-14XX de hp. En la Figura 3.20, se ilustra el transmisor óptico utilizado, mientras que en el Apéndice C se proporciona las especificaciones de operación.

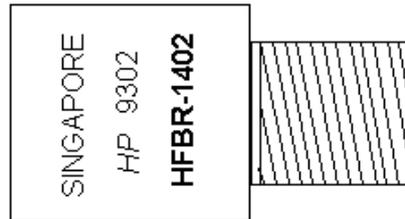


Figura 3.20. Transmisor óptico HFBR-1402.

El transmisor óptico seleccionado es un LED del tipo BURRUS, construido de material de GaAlAs, el cual tiene una longitud de onda típica de 820nm, a una apertura numérica de 0.49, proporcionando una potencia óptica típica de -12dBm, a una corriente de 60mA y a una temperatura de 25°C.

Las especificaciones eléctricas y ópticas son:

- Voltaje inverso de entrada 3.8V.
- Voltaje de directa 1.48-2.09V.
- Capacitancia del diodo 55μF.
- Emisión pico de longitud de onda máximo 852nm.
- Potencia óptica -0.006 dB/°C.
- Apertura numérica equivalente NA=0.49.
- Diámetro equivalente $D_r=290 \mu\text{m}$.

3.7 Fibra Óptica [8]

El medio utilizado para llevar a cabo la transmisión de señales es la fibra óptica que se muestra en la Figura 3.21.



Figura 3.21. Fibra óptica utilizada.

La información de la fibra óptica es la siguiente,

El código de la fibra: HFBR-BWS010, donde:

B - Código del cable 62.5/125 μm .

W - Código del conector SMA.

S - Código del canal sencillo.

010- Código de longitud 10ft (3 metros).

Dimensiones mecánicas:

Diámetro del núcleo: 62.5 μm .

Diámetro del revestimiento: 125 μm .

Diámetro de la capa primaria: 900 μm .

Diámetro del cable exterior 2.9mm

Especificaciones ópticas a 850nm.

Atenuación máxima=4.0 dB/km.

Atenuación típica=3.5 dB/km.

Ancho de banda modal mínima= 100 MHz-km.

Apertura numérica=0.275

3.8. Receptor

La función principal del receptor en la transmisión de señales por fibra óptica es captar la señal en forma de luz inyectada por el emisor y ser capaz de proporcionar una señal eléctrica lo suficientemente útil para así ser amplificada y demodularla para obtener la información transmitida.

3.8.1 Receptor Óptico

El detector óptico de fibra óptica utilizado es el HFBR-2404, diseñado con transmisores de fibra óptica HFBR-1402, 1404 y cable de fibra óptica 50/125 μm , 62.5/125 μm y 100/140 μm . La respuesta no varía con el tamaño de la fibra óptica.

La salida del receptor es una señal analógica que puede ser mejorada para una variedad de necesidades de distancias o de datos. El bajo costo de los componentes

externos puede ser usado para convertir una salida análoga a niveles de señal de lógica compatible para varias formas y velocidades de datos arriba de 35 Mbit/seg. El detector HFBR-2404 contiene un PIN-Fotodiodo y un preamplificador de transimpedancia de bajo ruido con salida invertida. El HFBR-2404 recibe una señal óptica y la convierte en una señal de voltaje analógica. La respuesta a la frecuencia es típicamente de corriente directa hasta 25MHz, debido a esto es un receptor análogo. En la Figura 3.22 se muestra el detector utilizado.

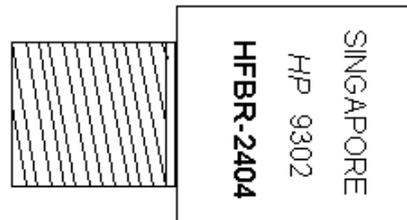


Figura 3.22. Receptor óptico HFBR-2404.

En el apéndice D se proporcionan las especificaciones de operación del detector.

Las especificaciones eléctricas y ópticas son:

- Reponsividad $R_p=7 \text{ mV}/\mu\text{W}$ a 820nm.
- Potencia de entrada pico $P_r=12.6\text{dBm}$ o $P_r= 55\mu\text{m}$.
- Impedancia de salida $Z_o= 20\Omega$.
- Voltaje de salida en CD $V_{\text{odc}}=0.7\text{V}$ a $P_r=0\mu\text{W}$.
- Apertura numérica equivalente $NA=0.35$.
- Diámetro equivalente $D_r=250 \mu\text{m}$.

3.8.2 Filtrado y Amplificación

El voltaje de salida en el receptor óptico proporciona un rango de -0.5V a 1.0V, sobre una componente de un voltaje de corriente de directa. El objetivo del filtro pasaltas es eliminar la componente de CD y darle una ganancia de once, para evitar amplificar el ruido; el segundo amplificador proporciona una ganancia de voltaje de menos siete para incrementar su magnitud, ya sin ruido. En la Figura 3.23 muestra el circuito mencionado.

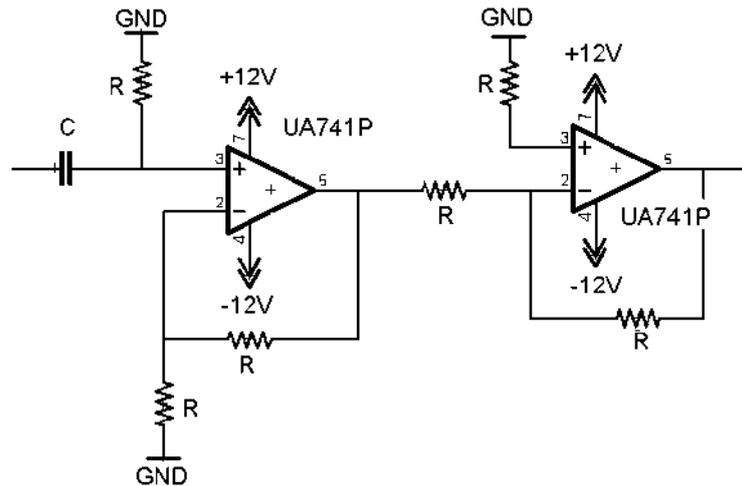


Figura 3.23. Circuito de filtrado y amplificación.

El filtro pasa-altas tiene una frecuencia de corte de:

$$F_L = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3.42)$$

donde $R=30k\Omega$ y $C=0.01\mu f$.

$$F_L = \frac{1}{2\pi(30k\Omega)(0.01\mu f)} = 530\text{Hz} \quad (3.43)$$

Con circuito pasa-altas con la frecuencia de corte calculada, se garantiza que la componente de CD generada por el receptor óptico será eliminada, dejando pasar solo las componentes arriba de los 530Hz, en donde se encuentran las señales de interés de las cuales, la de menor frecuencia es de 800Hz y por lo tanto, no la afectaría.

3.8.3 Filtros Pasa-Banda

Una vez que ha sido amplificada y eliminado la componente de directa, la señal que proviene del receptor óptico, es una señal compuesta, es decir, que contiene componentes de distinta frecuencia, como se muestra en la Figura 3.24.

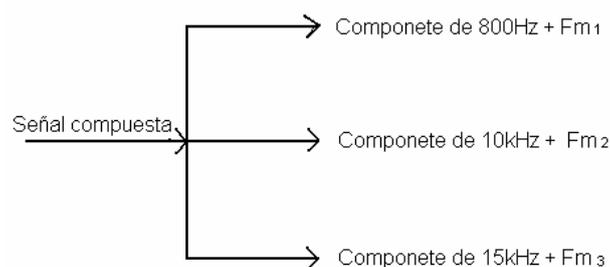


Figura 3.24. Componentes de señal compuesta.

Para obtener cada una de las componentes mostradas en la Figura 3.24 se utilizó el filtro pasa-banda de banda estrecha de segundo orden, a fin de seleccionar únicamente la componente de frecuencia de interés, de entre otras componentes; el cual se muestra en la Figura 3.25.

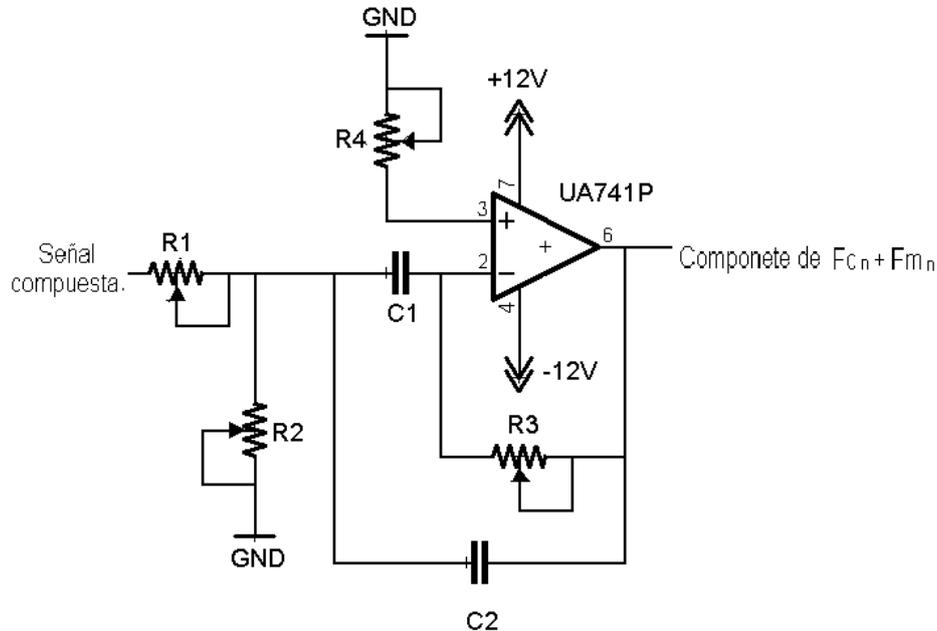


Figura 3.25. Filtro pasa banda de banda estrecha de segundo orden.

Si se selecciona $C_1=C_2=C$ se obtiene las siguientes expresiones:

$$R1 = \frac{Q}{2\pi F_c C A_f} \quad (3.44)$$

$$R2 = \frac{Q}{2\pi F_c C (2Q^2 - A_f)} \quad (3.45)$$

$$R3 = \frac{Q}{\pi F_c C} \quad (3.46)$$

$$R4 = R3 // R2 // R1 \quad (3.47)$$

$$A_f = \frac{R3}{2R2} \quad (3.48)$$

donde:

A_f es la ganancia de la frecuencia central F_c , y debiéndose cumplir la condición:

$$Q^2 > A_f$$

Las componentes a obtener son.

- 800Hz + F_{m1}
- 10kHz + F_{m2}

- $15\text{kHz} + F_{m3}$

donde F_{m1} , F_{m2} y F_{m3} son componentes de baja frecuencia.

Se selecciono un factor de calidad $Q=4$ para que sea altamente selectivo, con una ganancia de banda de paso unitario, $A_f=1$. Resolviendo las ecuaciones (3.44), (3.45) y (3.46) para cada una de las componentes a obtener, empezando con $800\text{Hz} + F_{m1}$ se tiene:

$$R1 = \frac{4}{2\pi(800\text{Hz})(0.01\mu\text{f})} = 77.579\text{ k}\Omega$$

$$R2 = \frac{4}{2\pi(800\text{Hz})(0.01\mu\text{f})[2(4)^2 - 1]} = 2.567\text{ k}\Omega$$

$$R3 = \frac{4}{\pi(800\text{Hz})(0.01\mu\text{f})} = 159.154\text{ k}\Omega$$

$$R4 = 2.44\text{ k}\Omega$$

El filtro pasa-banda para esta frecuencia se muestra en la Figura 3.26.

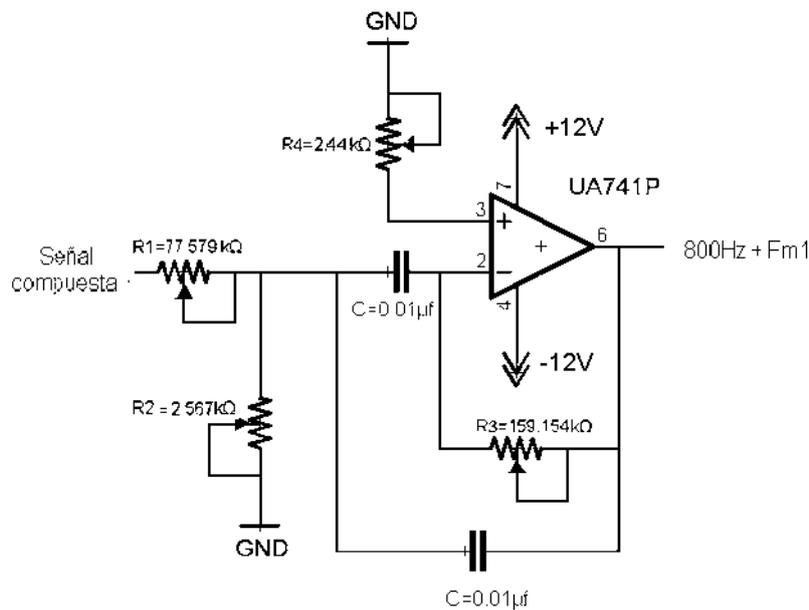


Figura 3.26. Filtro pasa-banda a $800\text{Hz} + F_{m1}$.

En la Figura 3.27 se muestra la respuesta a la frecuencia del filtro pasa-banda estrecha a $800\text{Hz} + F_{m1}$.

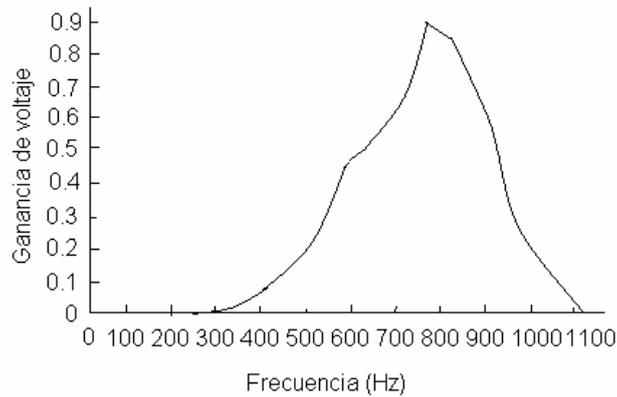


Figura 3.27. Respuesta a la frecuencia del filtro pasa-banda estrecha a $800\text{Hz} + F_{m1}$.

La segunda componente de $10\text{kHz} + F_{m2}$ se obtuvo con el filtro de pasa-banda de banda estrecha con $Q=4$ y $A_f=1$; sustituyendo las ecuaciones (3.44), (3.45) y (3.46) se tiene los siguientes resultados:

$$R1 = \frac{4}{2\pi(10\text{kHz})(0.01\mu\text{f})} = 6.366\text{k}\Omega$$

$$R2 = \frac{4}{2\pi(10\text{kHz})(0.01\mu\text{f})[2(4)^2 - 1]} = 205.36\Omega$$

$$R3 = \frac{4}{\pi(10\text{kHz})(0.01\mu\text{f})} = 12.73\text{k}\Omega$$

$$R4 = 195\Omega$$

El filtro pasa-banda para esta frecuencia se muestra en la Figura 3.28.

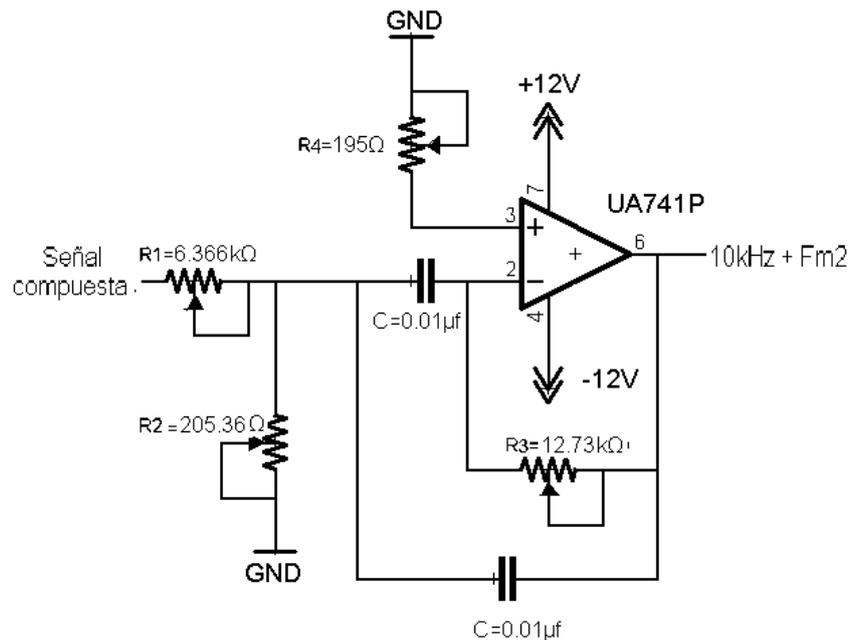


Figura 3.28. Filtro pasa-banda a $10\text{kHz} + F_{m2}$.

En la Figura 3.29 se muestra la respuesta a la frecuencia del filtro pasa-banda estrecha a $10\text{kHz} + F_{m2}$.

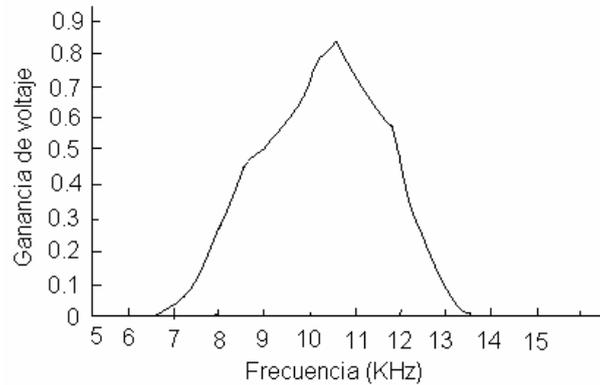


Figura 3.29. Respuesta a la frecuencia del filtro pasa-banda estrecha a $10\text{kHz} + F_{m2}$.

La tercera componente de $15\text{kHz} + F_{m3}$ se obtuvo con el filtro de pasa-banda de banda estrecha con $Q=4$ y $A_f=1$; sustituyendo las ecuaciones (3.44), (3.45) y (3.46) se tiene los siguientes resultados:

$$R1 = \frac{4}{2\pi(15\text{kHz})(0.01\mu\text{f})} = 4.244\text{ k}\Omega$$

$$R2 = \frac{4}{2\pi(15\text{kHz})(0.01\mu\text{f})[2(4)^2 - 1]} = 136.9\ \Omega$$

$$R3 = \frac{4}{\pi(15\text{kHz})(0.01\mu\text{f})} = 8.488\text{ k}\Omega$$

$$R4 = 130.58\ \Omega$$

El filtro pasa-banda para esta frecuencia se muestra en la Figura 3.30.

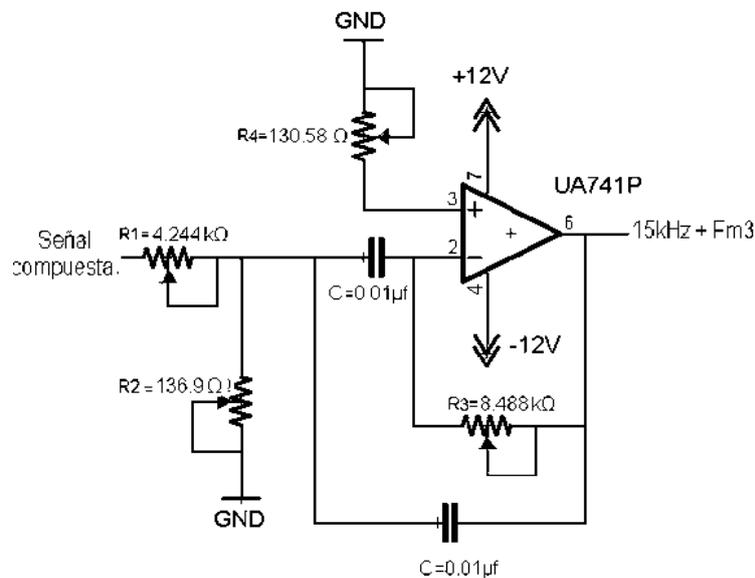


Figura 3.30. Filtro pasa-banda a $15\text{kHz} + F_{m3}$.

En la Figura 3.31 se muestra la respuesta a la frecuencia del filtro pasa-banda estrecha a $15\text{kHz} + F_{m3}$.

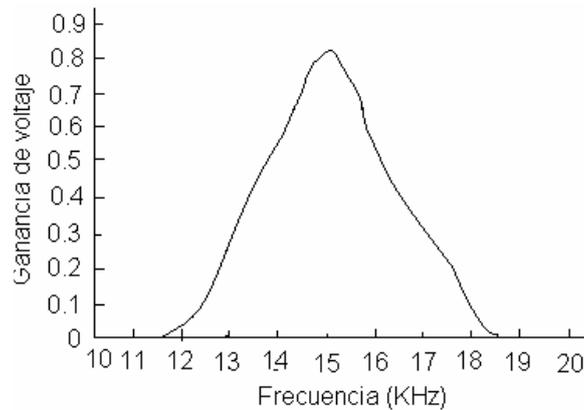
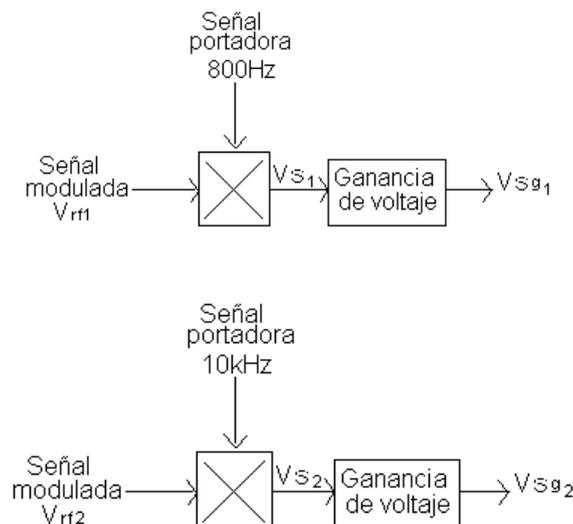


Figura 3.31. Respuesta a la frecuencia del filtro pasa-banda estrecha a $15\text{kHz} + F_{m3}$.

3.8.4 Demodulación [3, 2]

Demodulación es el proceso inverso de la modulación, es decir, la onda modulada se convierte nuevamente a su forma original. Una vez que las componentes de frecuencia ($800\text{Hz} + F_{m1}$, $10\text{kHz} + F_{m2}$ y $15\text{kHz} + F_{m3}$) han sido separadas, es necesario el proceso de demodulación, a través del cual se recupera la señal modulada y se obtiene cada uno de los mensajes transmitidos.

El proceso de demodulación se realiza en tres etapas; la primera es la multiplicación analógica de cada señal modulada por su correspondiente señal portadora, ilustrada en la Figura 3.32.



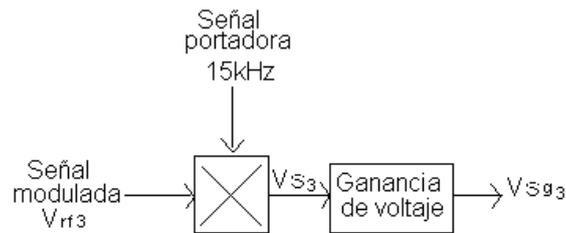


Figura 3.32. Proceso de demodulación.

Al realizar la multiplicación analógica de una señal modulada con su señal portadora se tiene:

$$V_s = [A_m \cos W_m t][A_c \cos W_c t] \quad (3.49)$$

$$V_s = \frac{A_c^2}{2} A_m \cos W_m t + A_m \cos W_m t \frac{A_c^2}{2} \cos(2W_c t) \quad (3.50)$$

La multiplicación analógica de la señal modulada por la correspondiente señal portadora, se realizó con el uso del circuito AD534J, el cual se describió con detalle en la sección 3.5.4, las expresiones resultantes están dadas de la siguiente manera:

$$V_{s1} = \frac{A_{c1}^2}{2} A_{m1} \cos W_{m1} t + A_{m1} \cos W_{m1} t \frac{A_{c1}^2}{2} \cos(2W_{c1} t) \quad (3.51)$$

$$V_{s2} = \frac{A_{c2}^2}{2} A_{m2} \cos W_{m2} t + A_{m2} \cos W_{m2} t \frac{A_{c2}^2}{2} \cos(2W_{c2} t) \quad (3.52)$$

$$V_{s3} = \frac{A_{c3}^2}{2} A_{m3} \cos W_{m3} t + A_{m3} \cos W_{m3} t \frac{A_{c3}^2}{2} \cos(2W_{c3} t) \quad (3.53)$$

W_{m1} = Frecuencia de la señal modulante 1.

W_{c1} = Frecuencia de la señal portadora 1.

W_{m2} = Frecuencia de la señal modulante 2.

W_{c2} = Frecuencia de la señal portadora 2.

W_{m3} = Frecuencia de la señal modulante 3.

W_{c3} = Frecuencia de la señal portadora 3.

A_{c1} = Magnitud de la señal portadora 1.

A_{m1} = Magnitud de la señal modulante 1.

A_{c2} = Magnitud de la señal portadora 2.

A_{m2} = Magnitud de la señal modulante 2.

A_{c3} = Magnitud de la señal portadora 3.

A_{m3} = Magnitud de la señal modulante 3.

Se observa que la magnitud de voltaje en cada una de las señales V_{s1} , V_{s2} y V_{s3} es pequeña; como se vera en el Capitulo 4, sección 4.2.8; por lo tanto, es necesario que se le proporcione una ganancia de menos cinco, como lo muestra la Figura 3.33, para evitar las señales débiles.

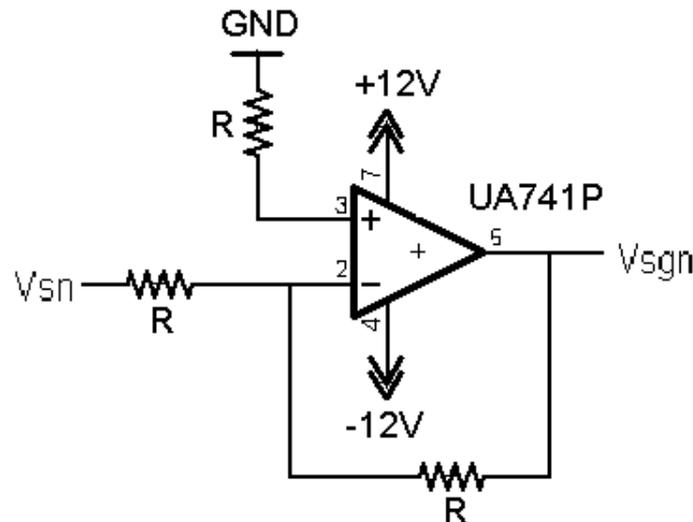


Figura 3.33. Circuito de ganancia de menos cinco.

3.8.5 Filtro Pasa Bajas

La segunda etapa consiste en la aplicación de un filtro pasa-bajas a la resultante de la señal multiplicada, ya que en ella se encuentra la señal modulada y una componente de doble frecuencia de la portadora y por lo tanto, se elimina la señal de doble frecuencia. Cada uno de los filtros pasa-bajas corresponde a la señal modulante que se trate.

El filtro pasa-bajas que se utilizó, es un filtro activo de segundo orden que permite dejar pasar frecuencias desde cero hasta una frecuencia de corte seleccionada, a partir de la cual se tiene una atenuación de 40 dB/dec, por ser de segundo orden; la Figura 3.34 muestra el filtro.

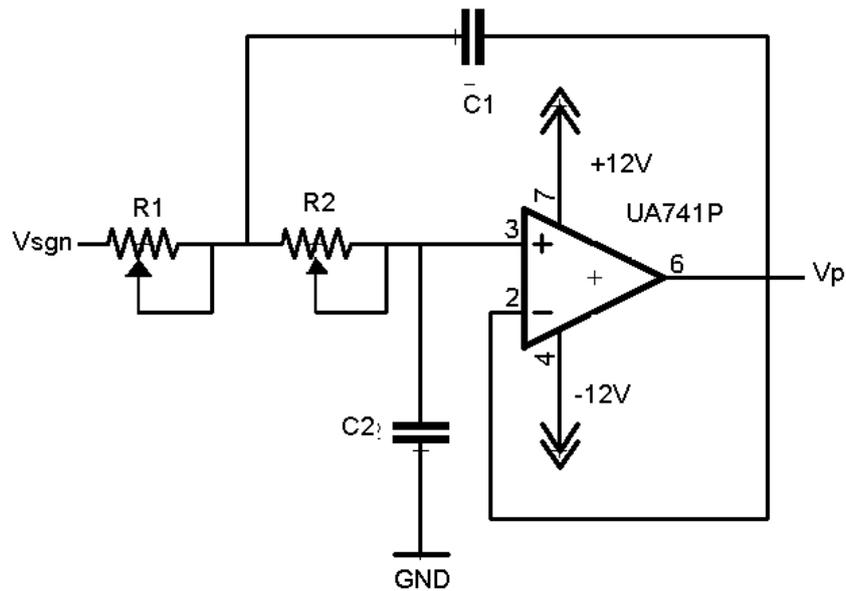


Figura 3.34. Filtro pasa-bajas de segundo orden.

Los componentes del circuito se calculan de la siguiente forma:

$$A_f=1 \quad (3.54)$$

$$R_1=R_2 \quad (3.55)$$

$$C_1=2C_2 \quad (3.56)$$

$$F_H=\frac{1}{2\pi\sqrt{2}C_2R_2} \quad (3.57)$$

La señal después del filtro pasa-bajas es:

$$V_p=k\frac{A_c^2}{2}A_m\cos Wmt \quad (3.58)$$

donde k es la ganancia de voltaje

El calculo para eliminar la componente de doble frecuencia de la señal modulada de $800\text{Hz} + F_{m1}$, la cual es de 1.6kHz , se resuelve utilizando la ecuación (3.57), donde $C_1=0.01\mu\text{F}$ y la frecuencia de corte es seleccionada de 200Hz . La Figura 3.35 muestra el circuito.

$$R_1=R_2=\frac{1}{2\pi\sqrt{2}0.01\mu\text{F}200\text{Hz}}=56.26\text{k}\Omega$$

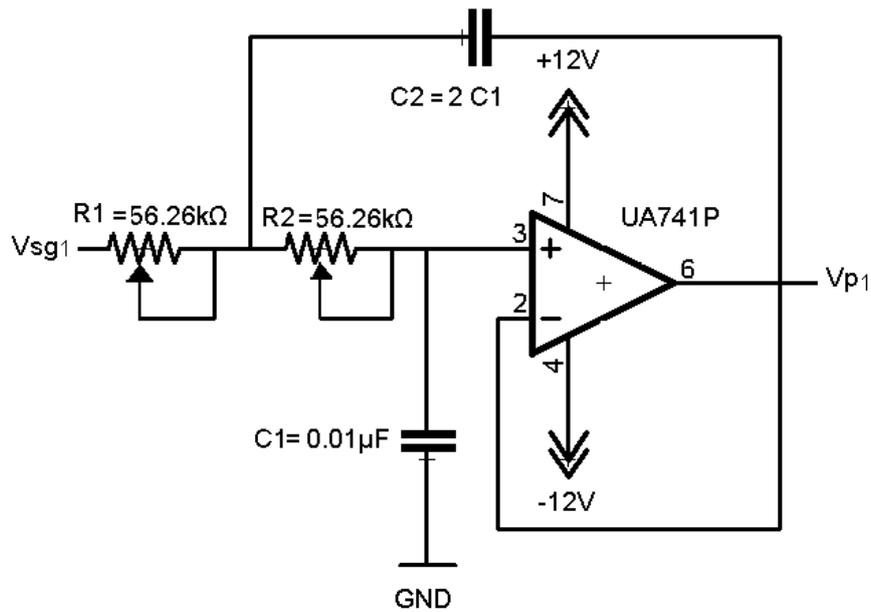


Figura 3.35. Circuito pasa altas con $F_h=200\text{Hz}$.

Las componentes de doble frecuencia de las señales moduladas de $10\text{kHz} + F_{m2}$ y $15\text{kHz} + F_{m3}$, las cuales son 20kHz y 30kHz respectivamente, son eliminadas con el circuito pasa altas mostrado en la Figura 3.36 a una frecuencia de corte de 1.125kHz .

$$R_1=R_2=\frac{1}{2\pi\sqrt{2} \cdot 0.01\mu\text{F} \cdot 1.125\text{kHz}}=10\text{k}\Omega$$

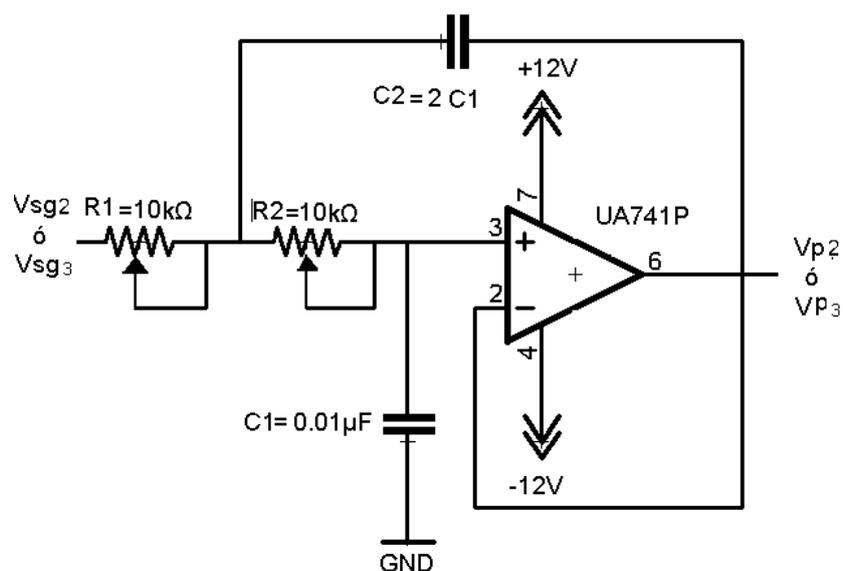


Figura 3.36. Circuito pasa altas con $F_h=1.125\text{kHz}$.

3.8.6 Amplificación Final

La tercera y última etapa es la ganancia adecuada en amplitud para cada una de las señales envolventes, debido que en los filtros pasa-banda y pasa-bajas están calculados a una ganancia de uno y en realidad tiene una ganancia cercana de 0.9, cada uno de los componentes no son idénticos y que el voltaje de salida del receptor óptico es difícil de determinar teóricamente, la ganancia se calculó experimentalmente, ya que es más fácil y práctico. La Figura 3.37 muestra el circuito de la ganancia final para las tres señales envolventes.

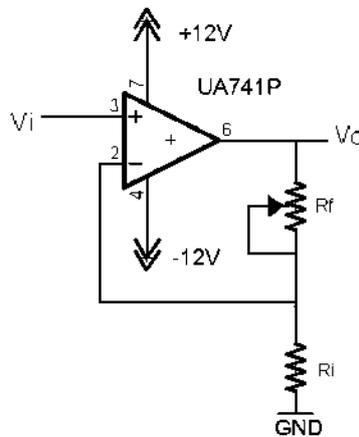


Figura 3.37. Circuito de amplificación final.

Para la amplificación final de cada una de las señales de la Figura 3.37 se tiene:

$$V_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) V_i \quad (3.59)$$

donde $R_i = 10\text{k}\Omega$

Se seleccionaron tres señales a transmitir, se midió el voltaje de entrada del circuito de amplificación final, determinando así R_f para que la señal transmitida sea idéntica en magnitud a la señal recibida, como se mostrará en el Capítulo 4. Para la señal senoidal de 104 Hz $V_i = 4.3\text{Vpp}$, para la señal cuadrada de 1.3Hz $V_i = 2.9\text{Vpp}$ y para la señal de cd $V_i = 1.2\text{Vcd}$; dando como resultados los siguientes valores:

R_f para la señal senoidal:

$$R_f = 1.62\text{k}\Omega \quad (3.60)$$

R_f para la señal cuadrada:

$$R_f = 2.06\text{k}\Omega \quad (3.61)$$

R_f para la señal de cd:

$$R_f = 833\Omega \quad (3.62)$$

Las ganancias que se les otorga a cada una de las señales; para que las magnitudes de las señales transmitidas sean iguales a las magnitudes de las señales recibidas; quedan de la siguiente forma:

- ganancia de la señal senoidal es de 1.62.
- ganancia de la señal cuadrada es de 1.06.
- ganancia de la señal de cd es de 1.08.

3.9 Diagrama General para el Sistema de Tres Señales

La figura 3.38 muestra el diagrama general para transmitir tres señales por fibra óptica donde se nota cada una de las etapas requeridas para llevarse a cabo la transmisión.

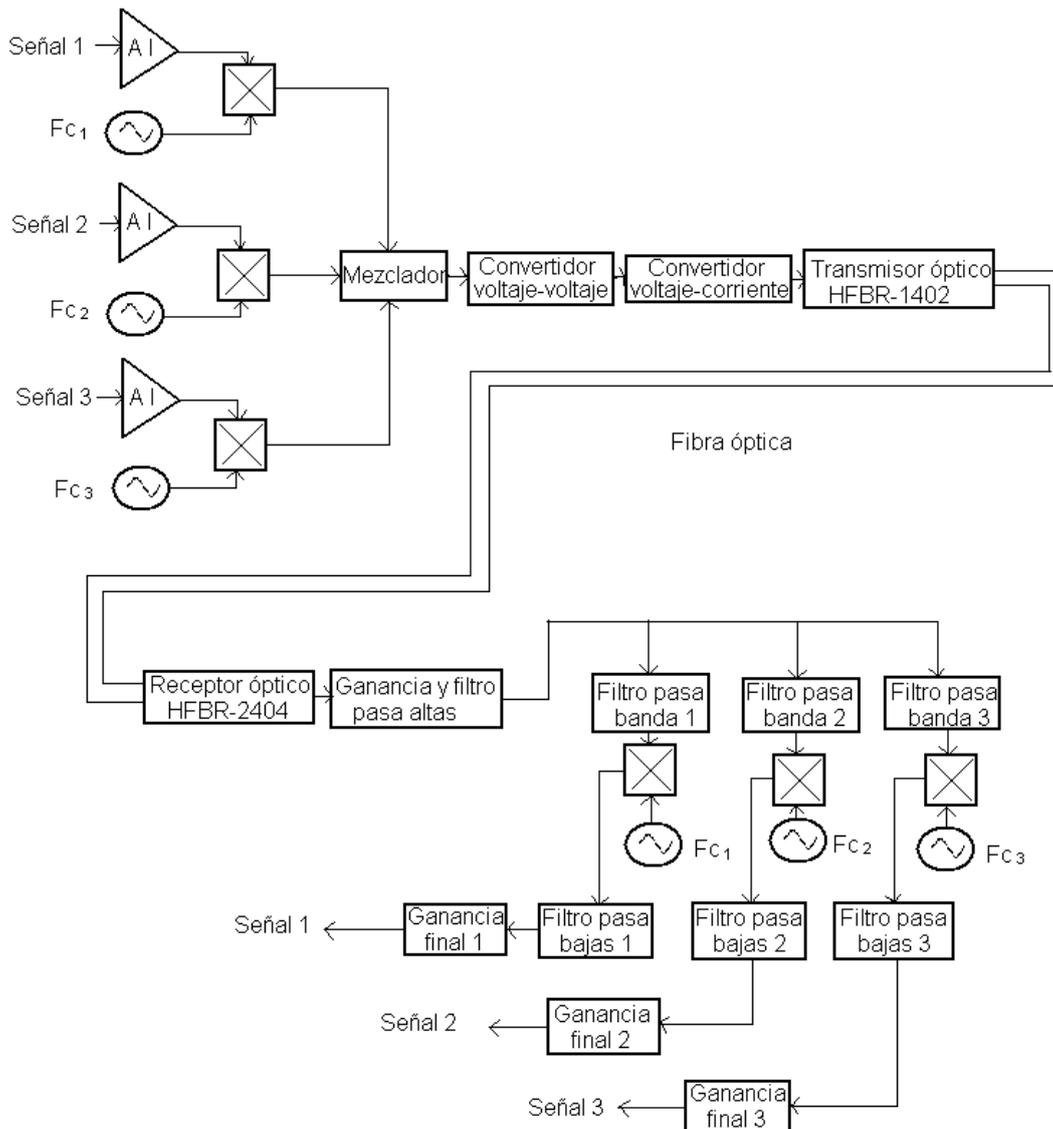


Figura 3.38. Diagrama general de transmisión para tres señales.

3.9.1 Diagrama General para el Sistema de N Señales

El diagrama general mostrado en la Figura 3.38, puede extenderse para N señales a transmitir. El diseño del sistema para N señales constituirá de las siguientes etapas:

- Seleccionar de manera adecuada cada frecuencia de señal portadora.
- Aumentar el número de entradas del mezclador.
- Rediseñar el convertidor voltaje-voltaje para los adecuados rangos con el fin de tener el correcto funcionamiento del sistema.
- Rediseñar el convertidor voltaje-corriente para obtener el correcto funcionamiento del transmisor óptico.
- Un transmisor óptico de acuerdo a la velocidad y pérdidas del sistema.
- Seleccionar una fibra óptica con el ancho de banda adecuado.
- Un receptor óptico de acuerdo a la velocidad y pérdidas del sistema.
- Diseñar los filtros pasa-banda de banda estrecha de acuerdo a las frecuencias de las portadoras señales portadoras aumentadas.
- Diseñar los filtros pasa-bajas para cada una de las señales
- Diseñar la ganancia final para cada señal, con el objetivo de que sean las mismas las señales enviadas y las recibidas.

La Figura 3.39 muestra el diagrama general para N señales.

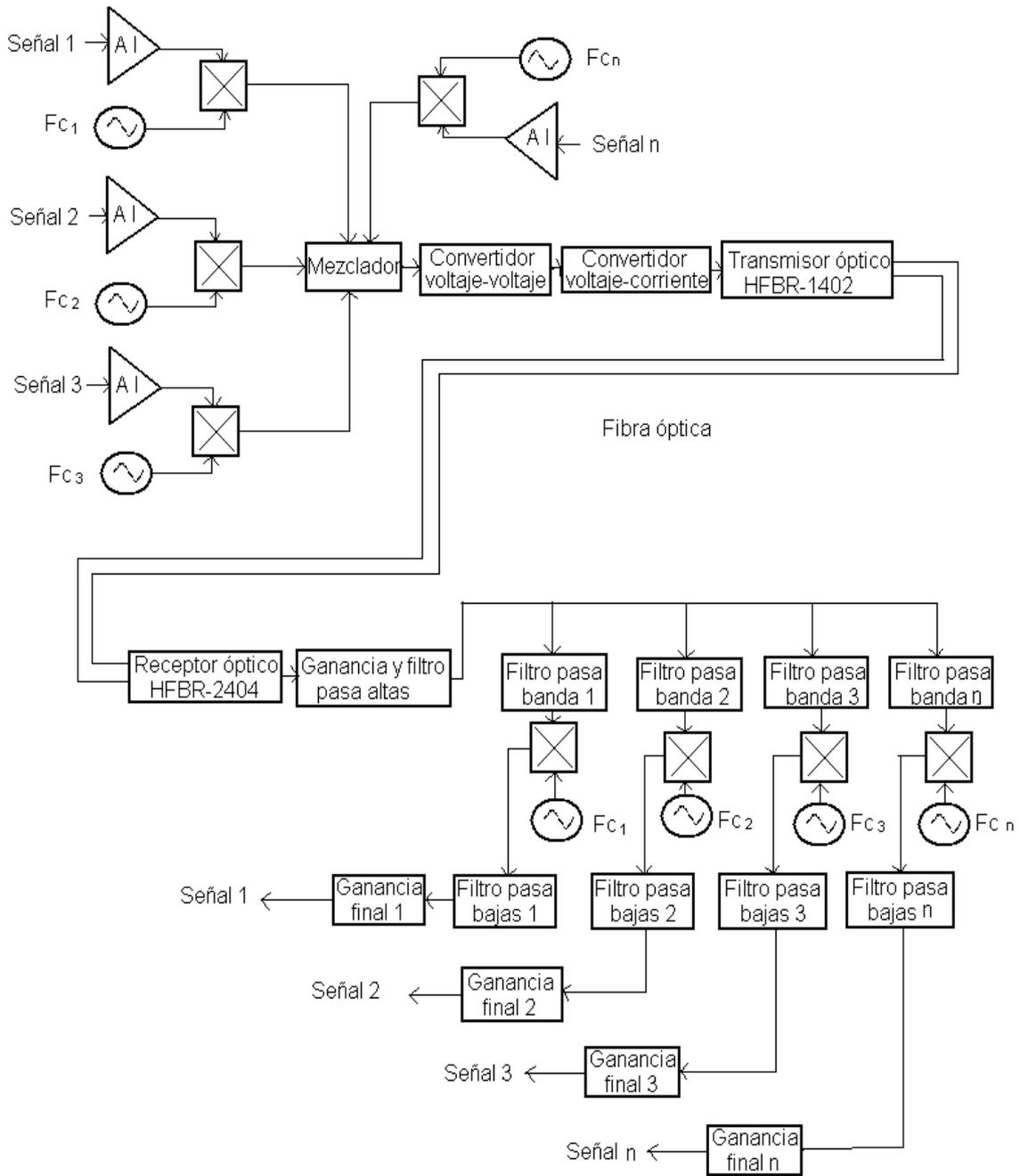


Figura 3.39. Diagrama general para N señales.

CAPITULO 4

Construcción del Circuito Impreso y Pruebas

El sistema desarrollado en el capítulo 3, para la transmisión de señales multiplexadas en frecuencia a través de una fibra óptica, se diseñó y construyó los circuitos impresos necesarios para su implementación y pruebas. Los cuales se mencionan a continuación: etapa de modulación, etapa de transmisión y mezclado, etapa de recepción y demodulación de dos señales y por ultimo, la etapa de recepción y demodulación de una señal.

4.1 Diseño del Circuito Impreso

El diseño del circuito impreso fue elaborado en EAGLE, donde inicialmente se elaboró el circuito esquemático detallando cada uno de los componentes requeridos para los valores específicos de cada una de las etapas. La Figura 4.1 muestra el diagrama esquemático donde se lleva a cabo la modulación de la señal a transmitir, que esta conformado por el amplificador de instrumentación, generador de la señal portadora y el multiplicador analógico de señales.

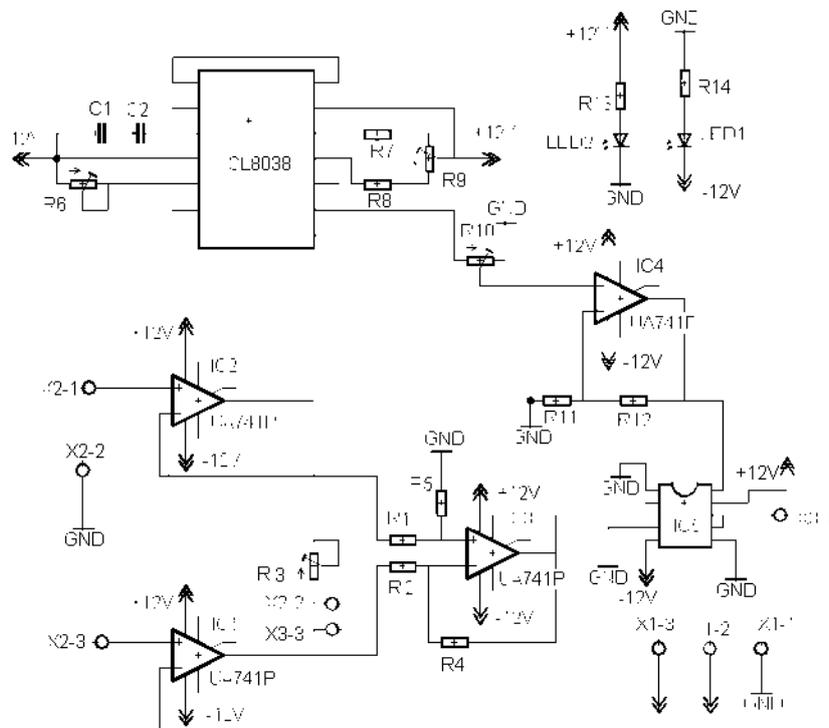


Figura 4.1. Diagrama esquemático de la etapa de modulación.

La Figura 4.2 muestra la tarjeta donde se visualizan las pistas que estarán en el circuito impreso.

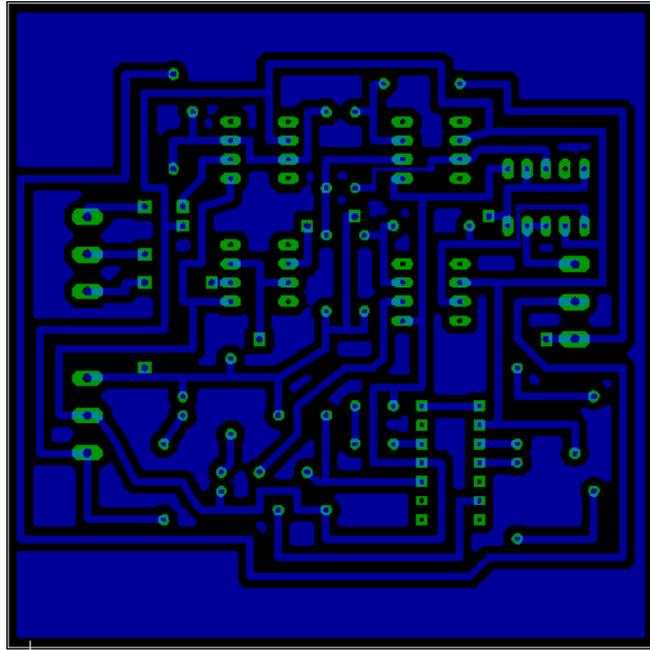


Figura 4.2. Tarjeta de pistas del circuito de la etapa de modulación.

La Figura 4.3 muestra la posición de cada uno de los componentes en la baquelita de la etapa de la modulación de la señal a transmitir.

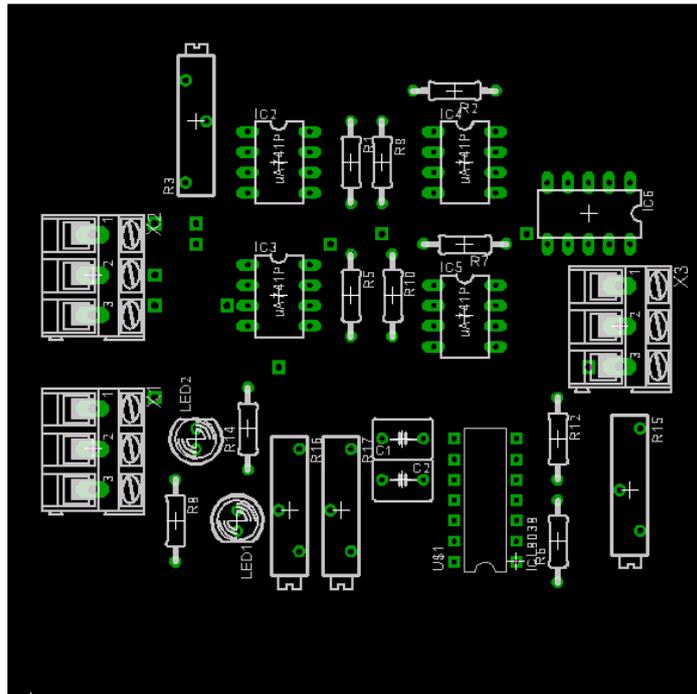


Figura 4.3. Posición de componentes de la etapa de modulación.

A continuación se muestra la fotografía del circuito implementado de la etapa de modulación ya terminado, Figura 4.4.

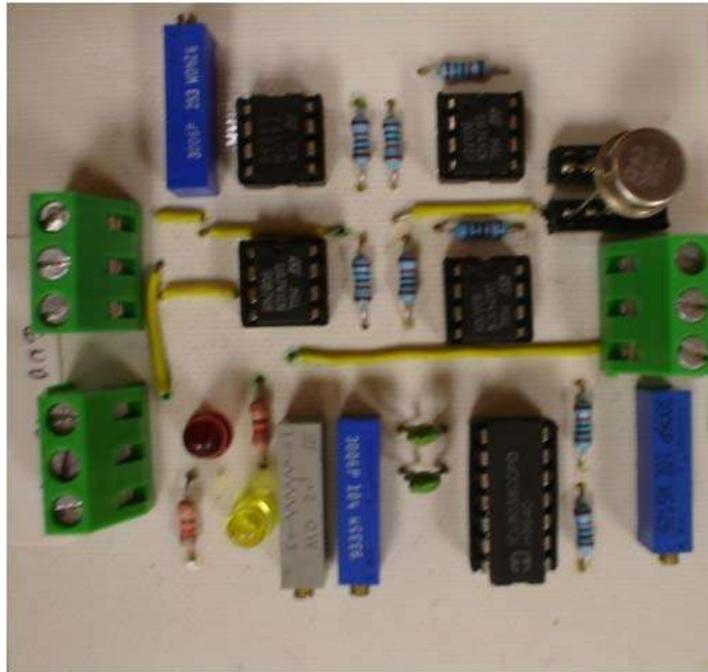


Figura 4.4. Circuito de la etapa de modulación terminado.

Se hace notar que los tres circuitos de modulación de señales son iguales, a excepción de que solo cambia el número de capacitores en la señal portadora de 15kHz.

La Figura 4.5 muestra el diagrama esquemático de transmisión y mezclado; esta conformado por el mezclador de señales, convertidor voltaje-voltaje, convertidor voltaje-corriente y el transmisor óptico.

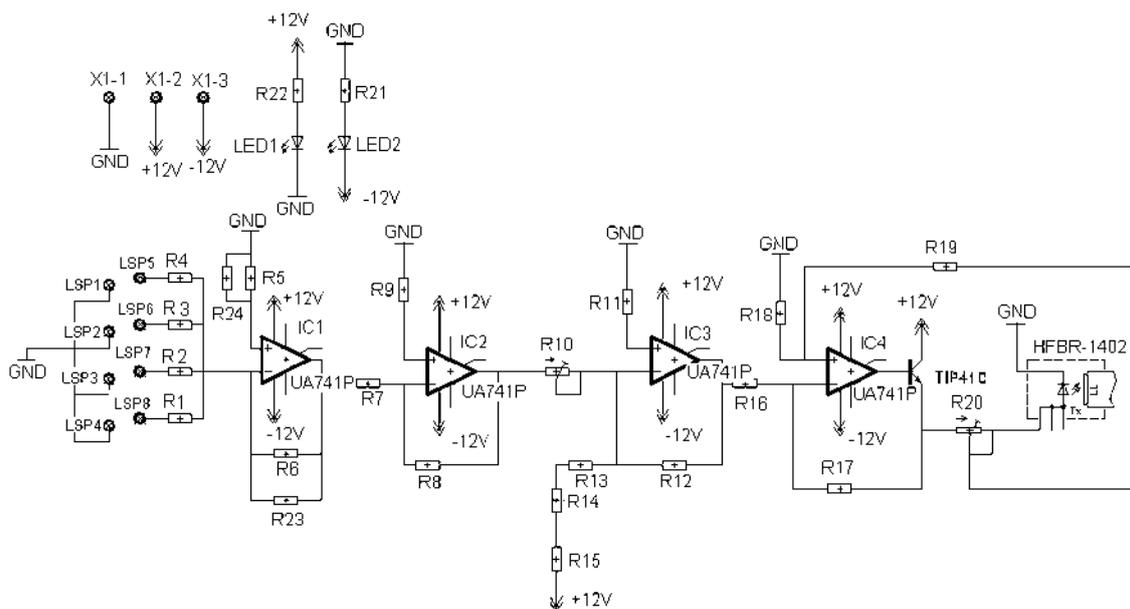


Figura 4.5. Diagrama esquemático de transmisión y mezclado.

La Figura 4.7 muestra la tarjeta donde se visualizan las pistas que estarán en el circuito impreso de la etapa de transmisión y mezclado.

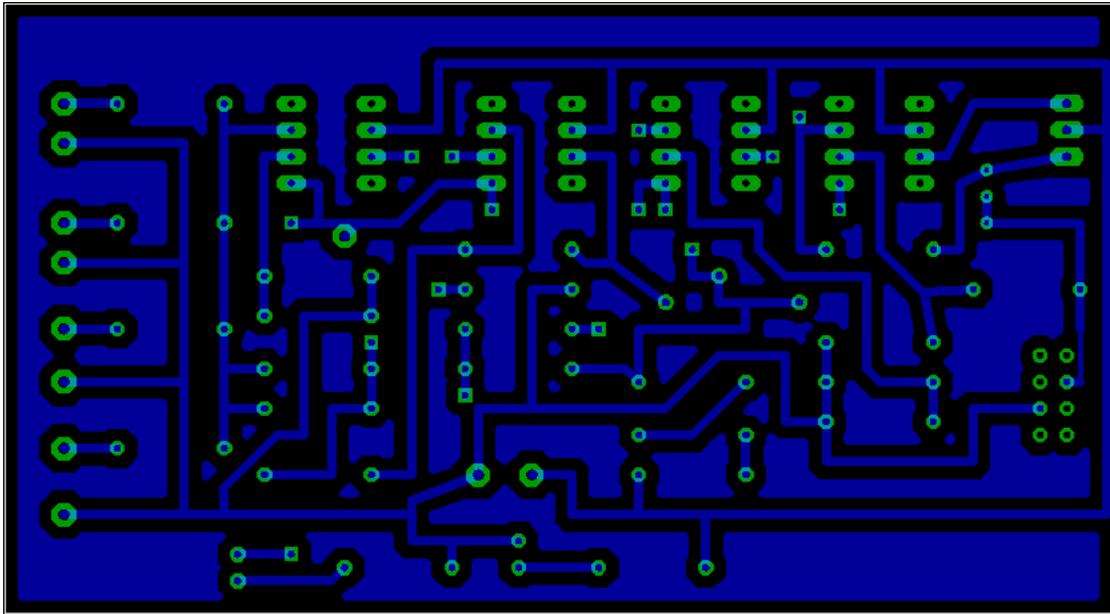


Figura 4.7. Tarjeta de pistas del circuito de transmisión y mezclado.

La Figura 4.8 muestra la posición de cada uno de los componentes en la baquelita en la etapa de transmisión y mezclado.

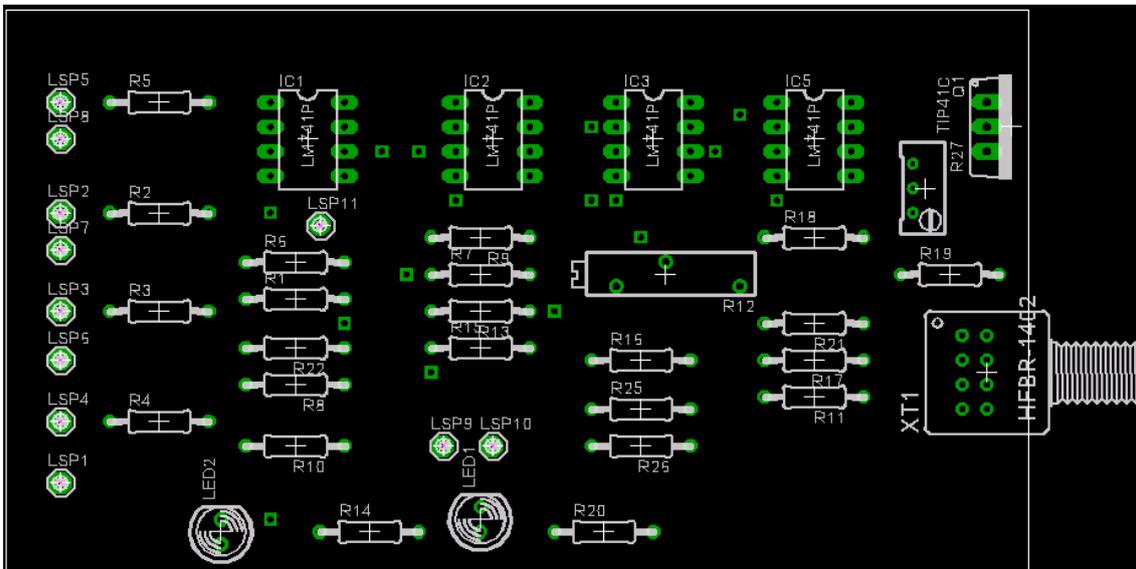


Figura 4.8. Posición de los componentes en la etapa de transmisión y mezclado.

A continuación se muestra la fotografía del circuito implementado de la etapa de transmisión y mezclado terminado, Figura 4.9.



Figura 4.9. Circuito de la etapa de transmisión y mezclado terminado.

En la Figura 4.10 se muestra el diagrama esquemático de la etapa de recepción de dos señales (800Hz y 10kHz); esta conformado por el receptor óptico, la amplificación y filtrado de la señal de cd de salida del receptor óptico, filtros pasa-bandas de 800Hz y 10kHz, multiplicadores analógicos, filtros pasa-bajas y circuitos de amplificación final.

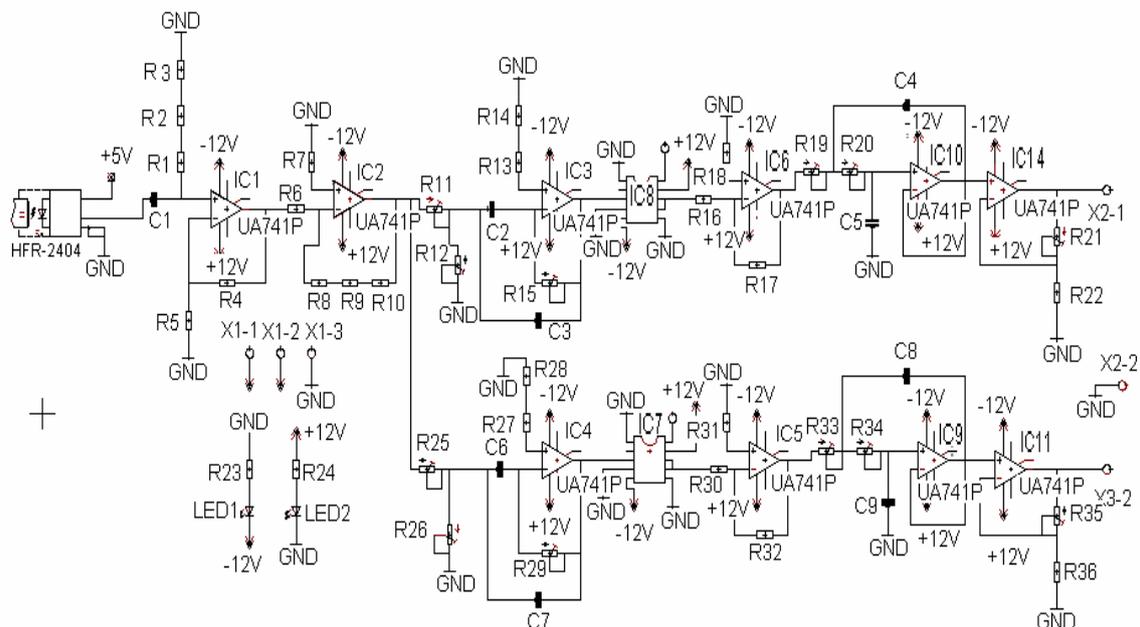


Figura 4.10. Diagrama esquemático de la etapa de recepción de dos señales.

La Figura 4.11 muestra la tarjeta donde se visualizan las pistas que estarán en el circuito impreso de la recepción de dos señales.

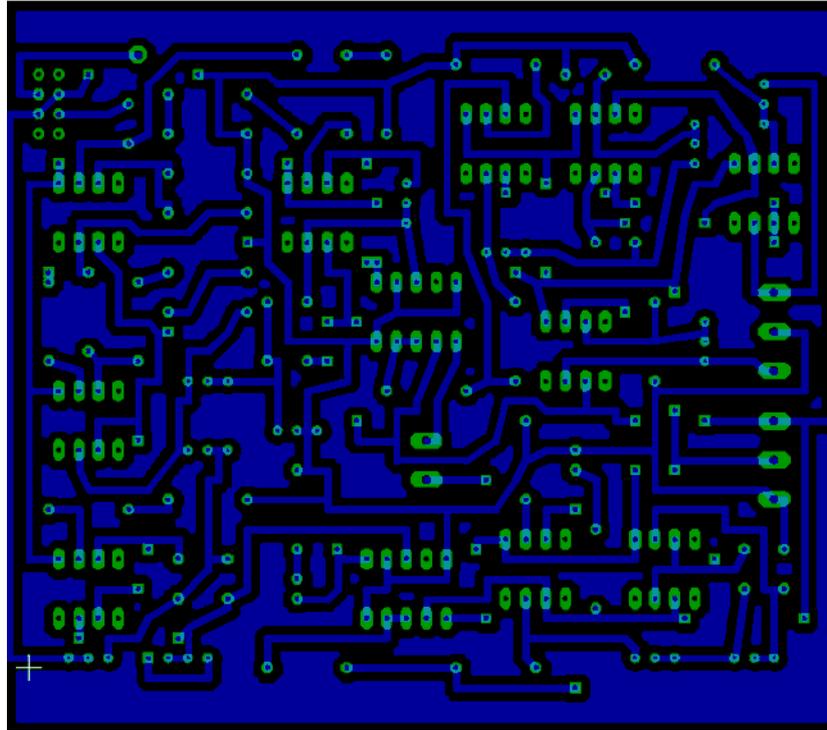


Figura 4.11. Tarjeta de pistas del circuito de recepción de dos señales.

La Figura 4.12 muestra la posición de cada uno de los componentes en la baquelita en la etapa de recepción de dos señales.

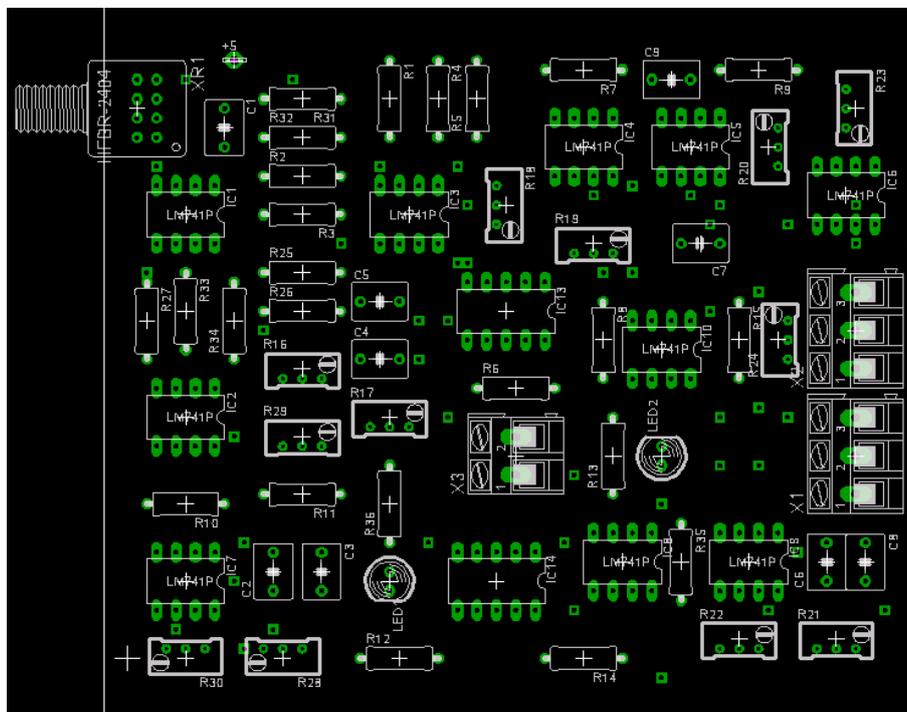


Figura 4.12. Posición de los componentes en la etapa de recepción de dos señales.

A continuación se muestra en la Figura 4.13 la fotografía del circuito implementado de la etapa de recepción de dos señales.

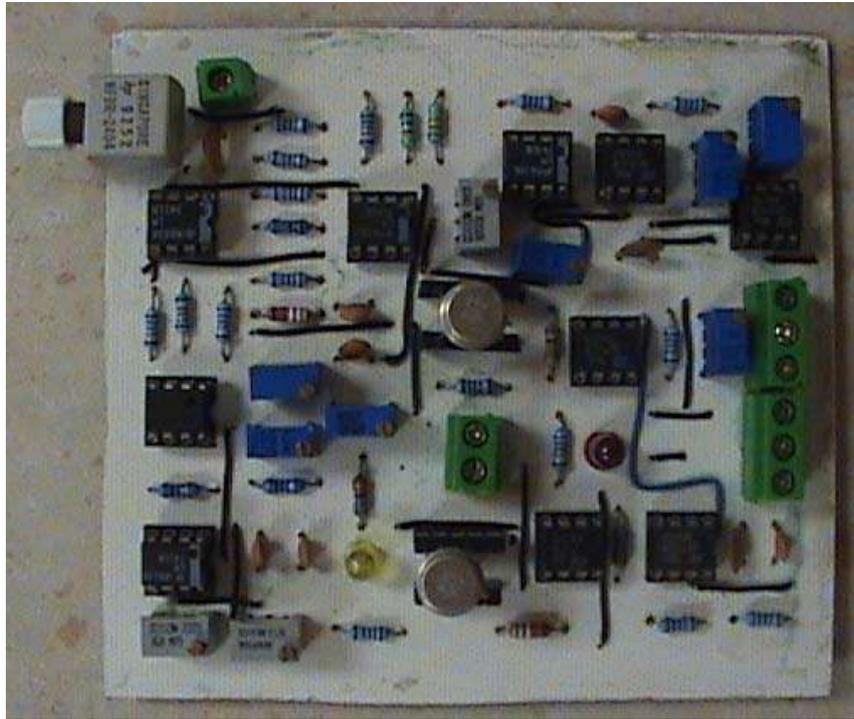


Figura 4.13. Circuito de la etapa de recepción de dos señales terminado.

La Figura 4.14 muestra el diagrama esquemático de la etapa de recepción para la señal de 15kHz; esta conformado por el filtro pasa-banda de 15kHz, multiplicador analógico, filtro pasa-bajas y un circuito de amplificación final.

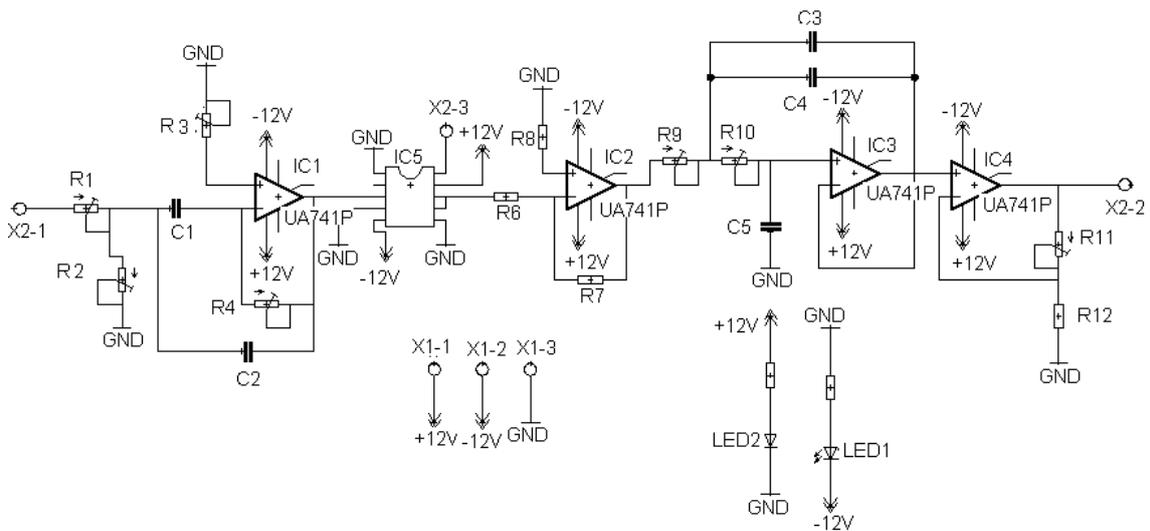


Figura 4.14. Diagrama esquemático de la etapa de recepción para una señal.

La Figura 4.15 muestra la tarjeta donde se visualizan las pistas que estarán en el circuito impreso de la etapa de recepción para una señal.

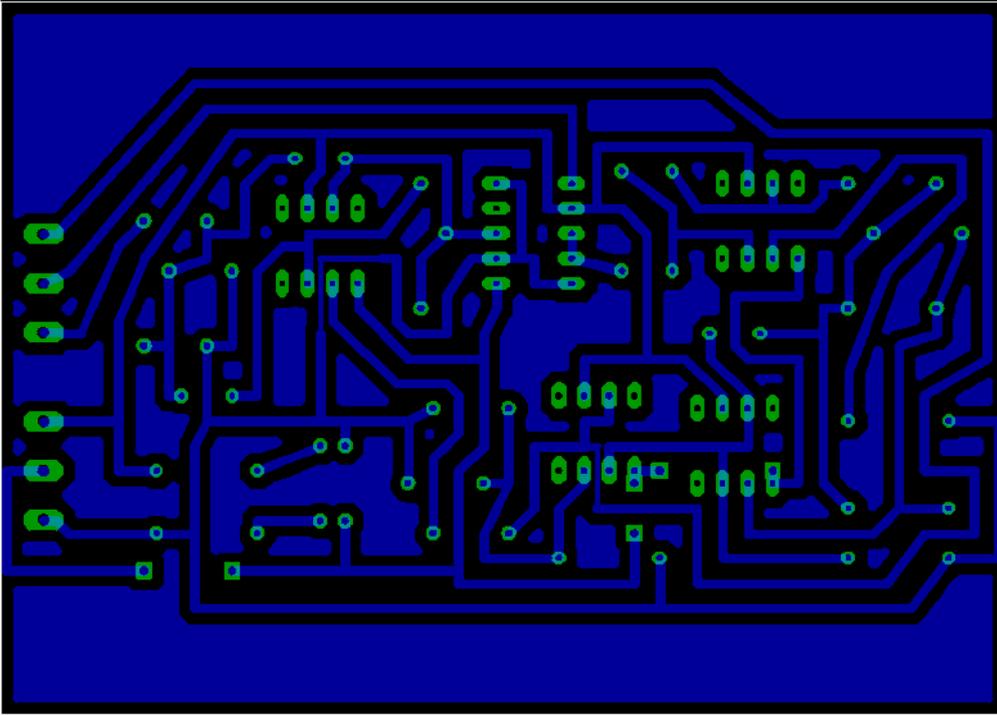


Figura 4.15. Tarjeta de pistas del circuito para la recepción de una señal.

La Figura 4.16 muestra la posición de cada uno de los componentes en la baquelita en la etapa de recepción para una señal.

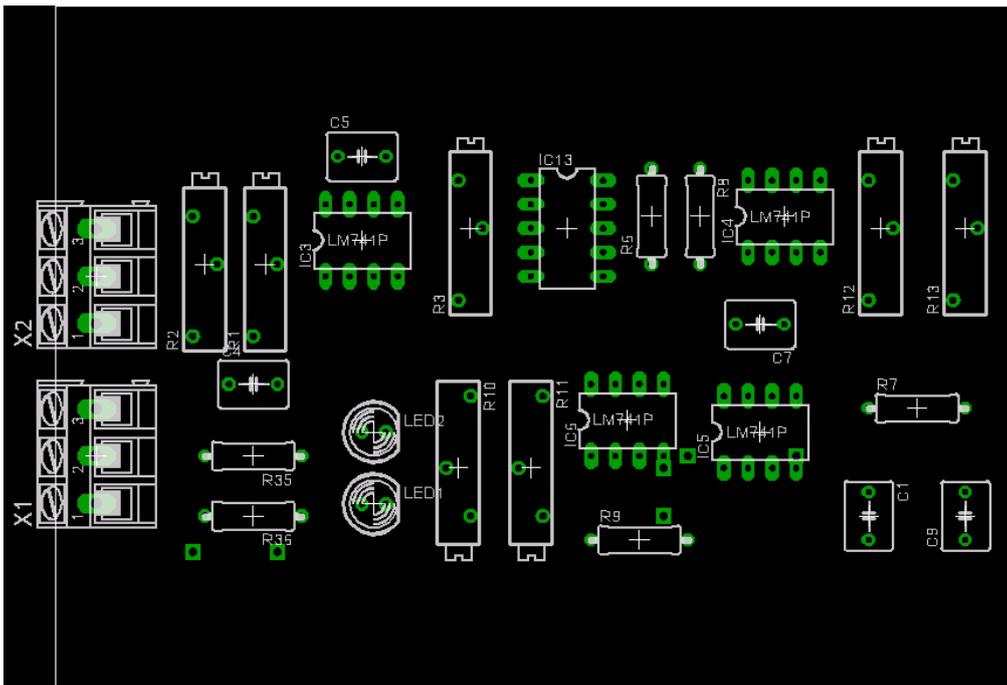


Figura 4.16. Posición de los componentes en la etapa de recepción para una señal.

A continuación se muestra en la Figura 4.17 la fotografía del circuito implementado de la etapa de recepción para una señal.

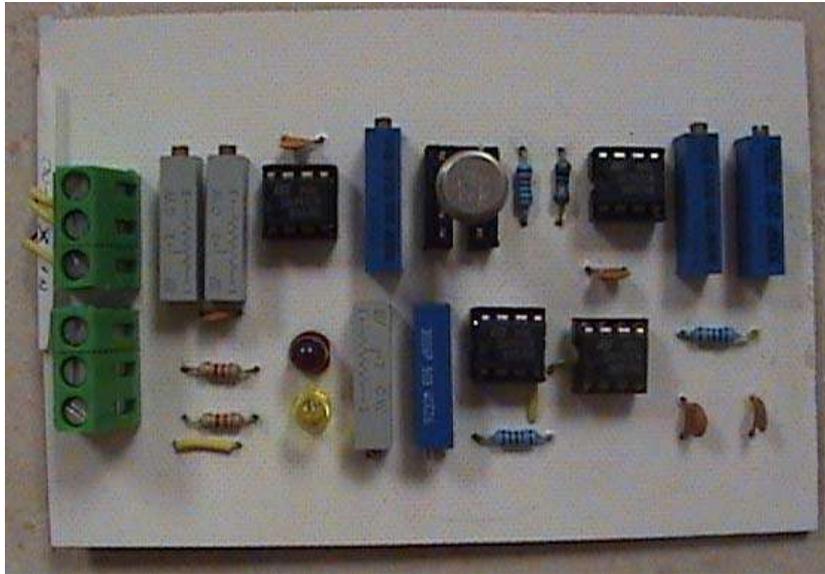


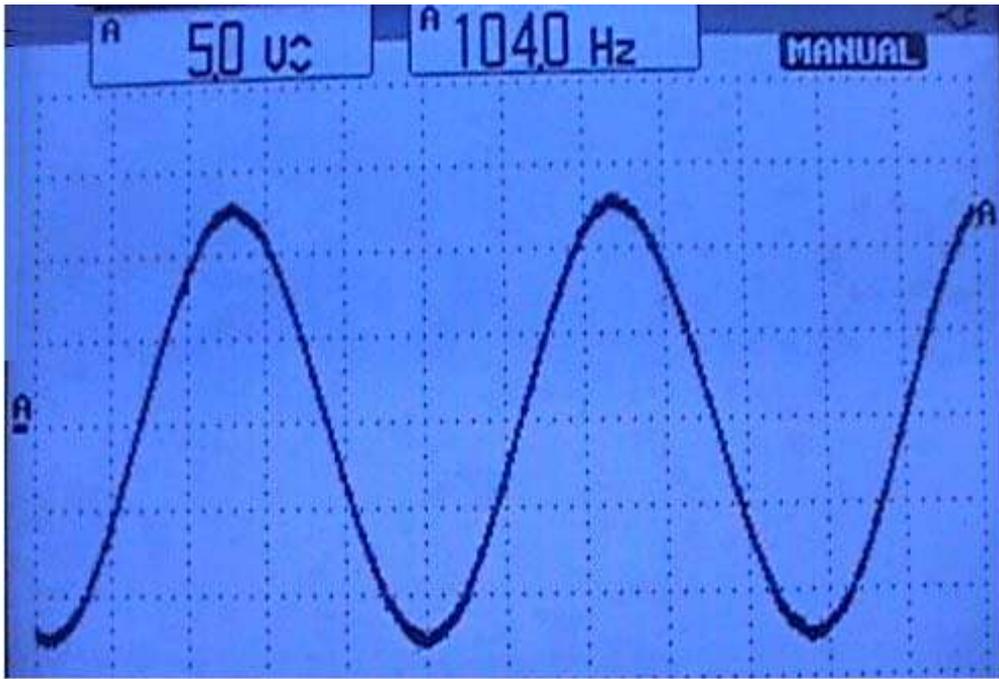
Figura 4.17. Circuito de la etapa de recepción para una señal terminado.

4.2 Pruebas al Circuito Impreso de Transmisión de Señales por Fibra Óptica

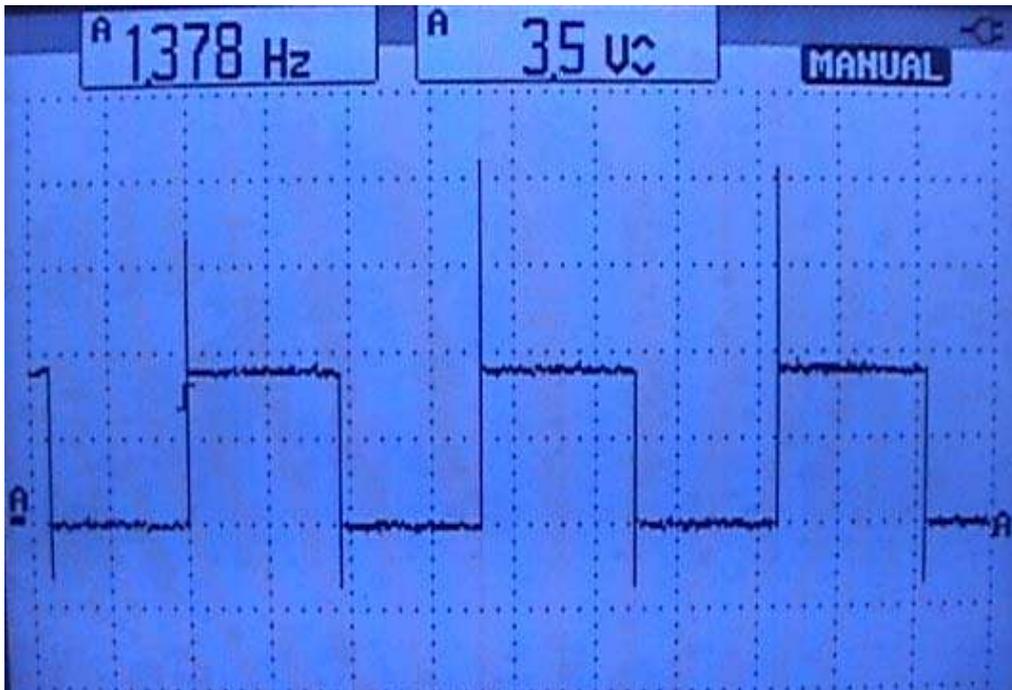
Las pruebas llevadas a cabo en los circuitos impresos implementados es la transmisión de señales senoidales, cuadradas, dientes de sierra y de cd, en donde se varía la frecuencia y la magnitud de voltaje de cada señal. Cada una de las señales fue transmitida con el propósito de demostrar el buen funcionamiento del sistema. A partir de la sección 4.2.1 se detalla cada una de las señales y etapas del sistema implementado.

4.2.1 Señales a Transmitir

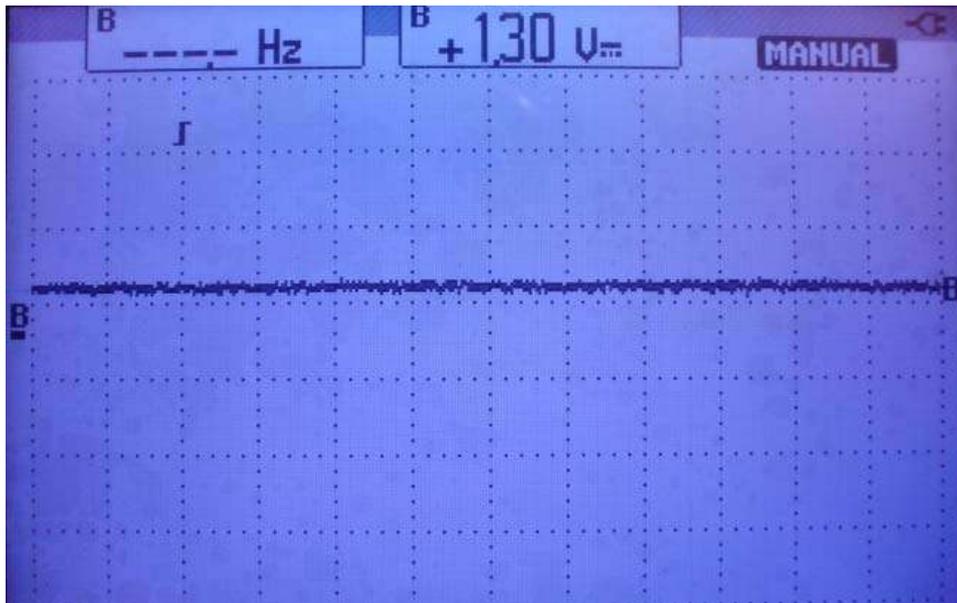
Las señales a transmitir son de frecuencias bajas y del rango de 1Vpp-5Vpp, se seleccionaron tres señales a transmitir las cuales son: una señal senoidal de 104 Hz a 5Vpp, una señal cuadrada generada por un 555 conectado como oscilador teniendo una frecuencia de 1.3 Hz a un voltaje de 3.5Vpp y por ultimo, un voltaje de directa de 1.3V. La Figura 4.18 muestra las señales.



a)



b)



c)

Figura 4.18. Señales transmitidas: a) señal senoidal, b) señal cuadrada
c) señal de directa.

En la Figura 4.19 se muestra el circuito utilizado para generar la señal de 1.3Hz con el 555.

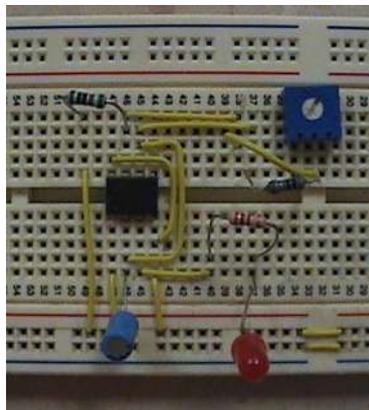


Figura 4.19. Señal cuadrada de 1.3Hz.

4.2.2 Señales Portadoras

Una de las características importantes de las señales portadoras es que deben ser de frecuencia y amplitud constante y que no incorpore ningún ruido adicional en su generación. Esto se logró con el ICL8038. Las señales portadoras son: 800Hz, 10kHz y 15kHz, y se muestran en las siguientes Figuras 4.20, 4.21 y 4.22, respectivamente.

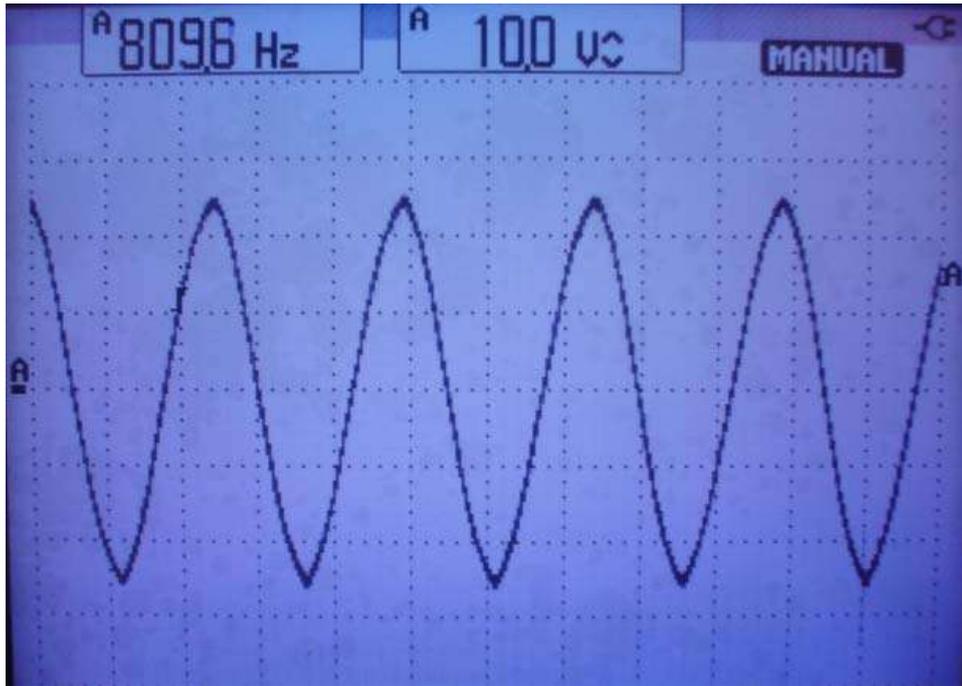


Figura 4.20. Señal portadora de 800Hz.

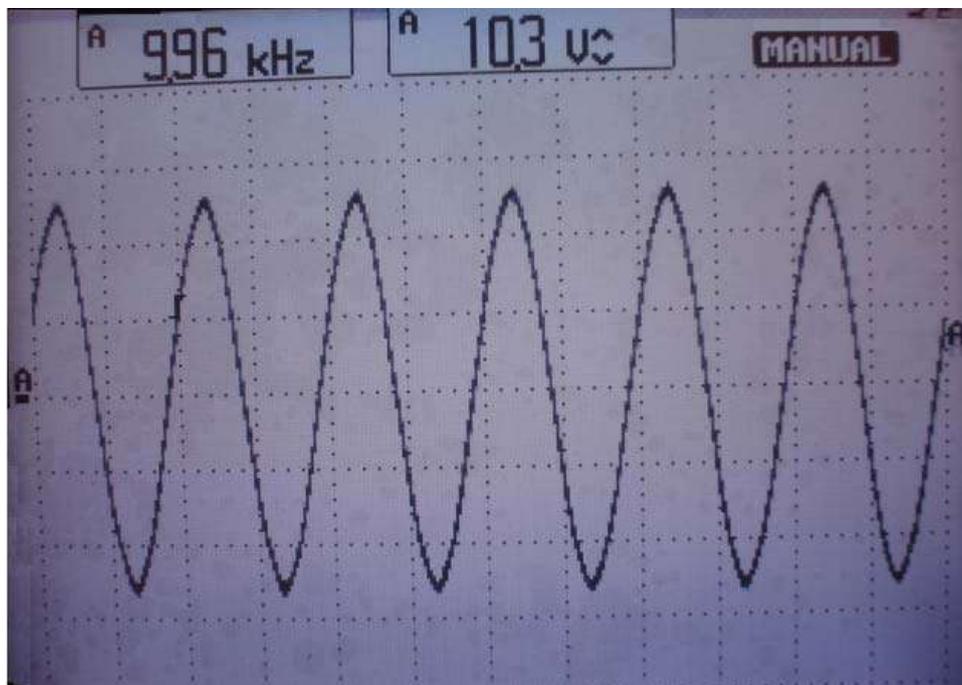


Figura 4.21. Señal portadora de 10kHz.

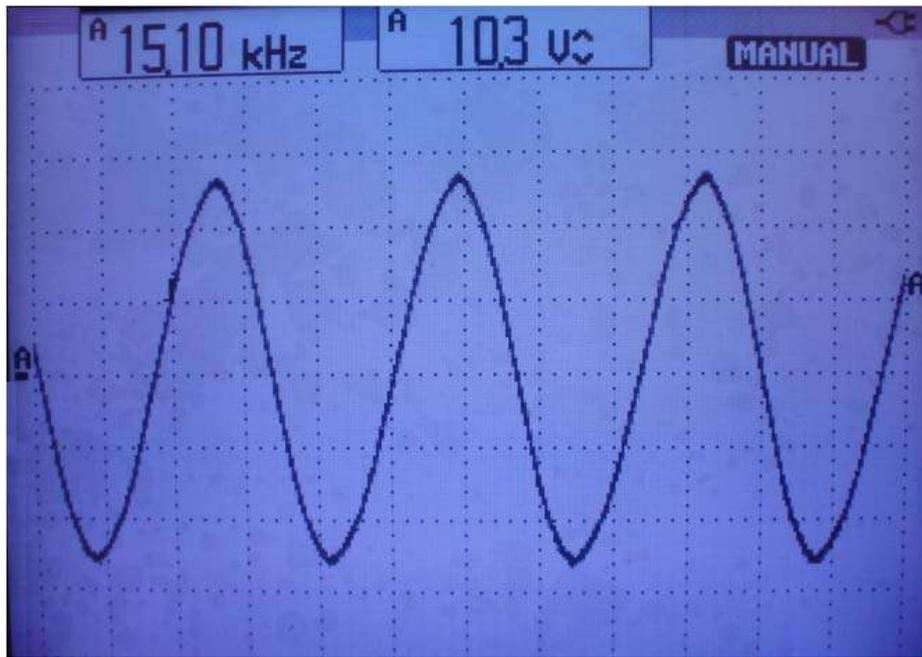
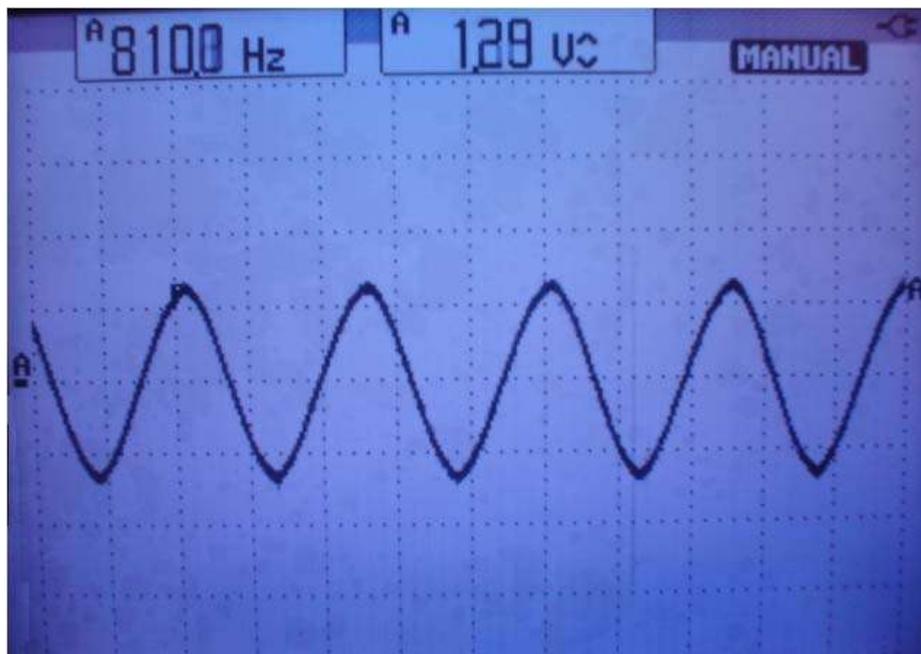


Figura 4.22. Señal portadora de 15kHz.

4.3.3 Modulación de Señales

Los resultados obtenidos al llevar a cabo la modulación de las señales portadoras y envolventes; 800Hz x 1.3Vcd, 10kHz x 1.3Hz y 15kHz x 104Hz, con el AD534J son los mostrados en la Figura 4.23, Figura 4.24 y Figura 4.25, respectivamente.



a)

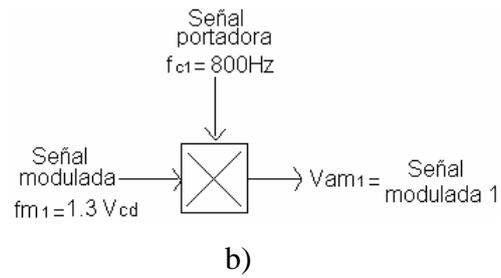


Figura 4.23. a) Señal modulada 800Hz b) Diagrama de bloques de la modulación.



a)

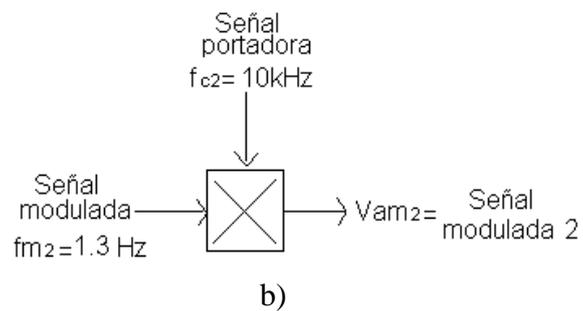
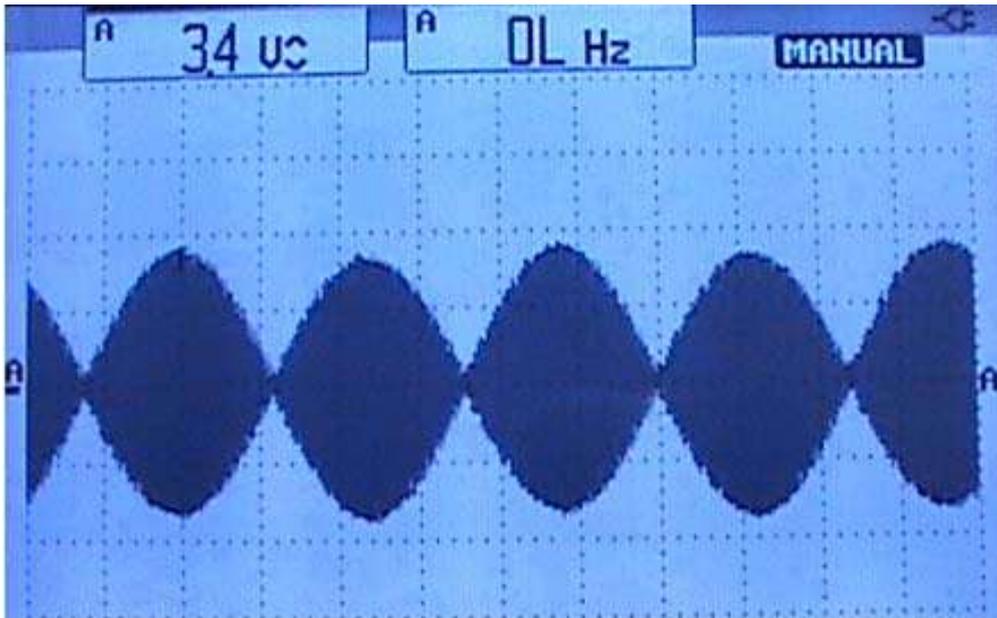
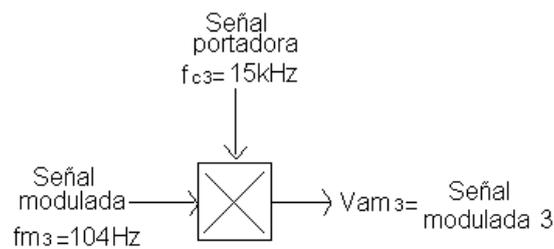


Figura 4.24. a) Señal modulada 10kHz b) Diagrama de bloques de la modulación.



a)



b)

Figura 4.25. a) Señal modulada 15kHz b) Diagrama de bloques de la modulación.

4.2.4 Señal de Salida del Mezclador de Señales

Es la etapa en la cual entran las tres componentes moduladas (800Hz x 1.3V_{cd}, 10kHz x 1.3Hz y 15kHz x 104Hz) y ocurre el mezclado, dando como resultado una señal compuesta, Figura 4.26.

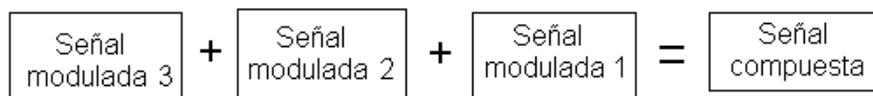


Figura 4.26. Salida del mezclador.

La salida del mezclador es una señal compuesta por 800Hz, 1.3V_{cd}, 10kHz, 1.3Hz, 15kHz y 104Hz. La Figura 4.27 muestra la salida del circuito implementado y se observa que esta compuesta por varias componentes.

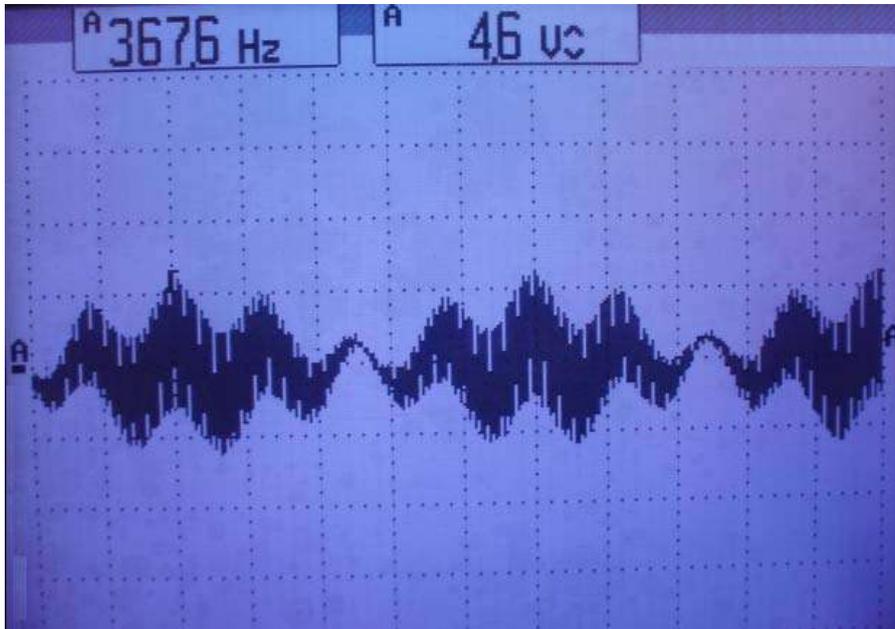


Figura 4.27. Salida del mezclador.

4.2.5 Señal del Convertidor Voltaje-Corriente

En esta etapa se presenta la señal compuesta transmitida, en la Figura 4.28; y en la sección 4.2.6 se mostrará que la señal es idéntica a la señal que se presenta en la recepción.

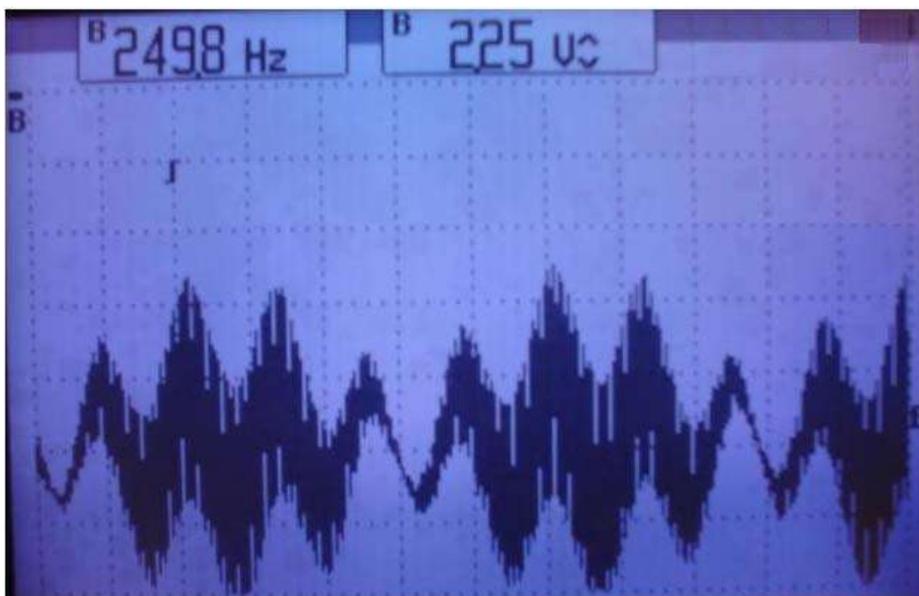


Figura 4.28. Señal transmitida.

4.2.6 Señal de Salida del Receptor Óptico

La Figura 4.29 muestra la señal de salida del receptor óptico donde se nota claramente que se necesita una amplificación para el incremento de magnitud y además un filtrado para eliminar la componente de cd, las cuales se les da en dos etapas.

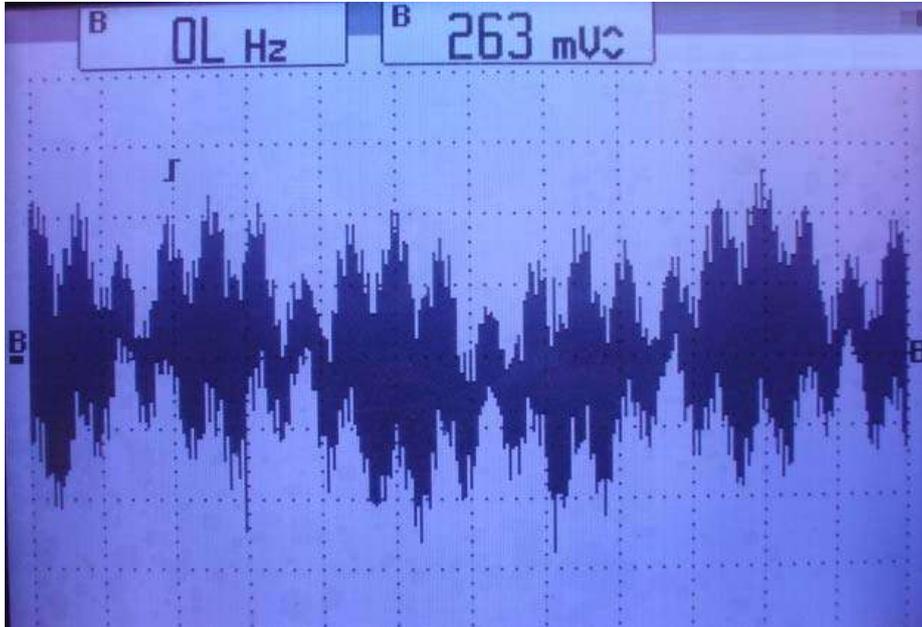


Figura 4.29. Señal del receptor óptico.

La primera etapa tiene una ganancia de once donde además, se elimina la componente de cd. La Figura 4.30 muestra la señal de salida del receptor óptico.

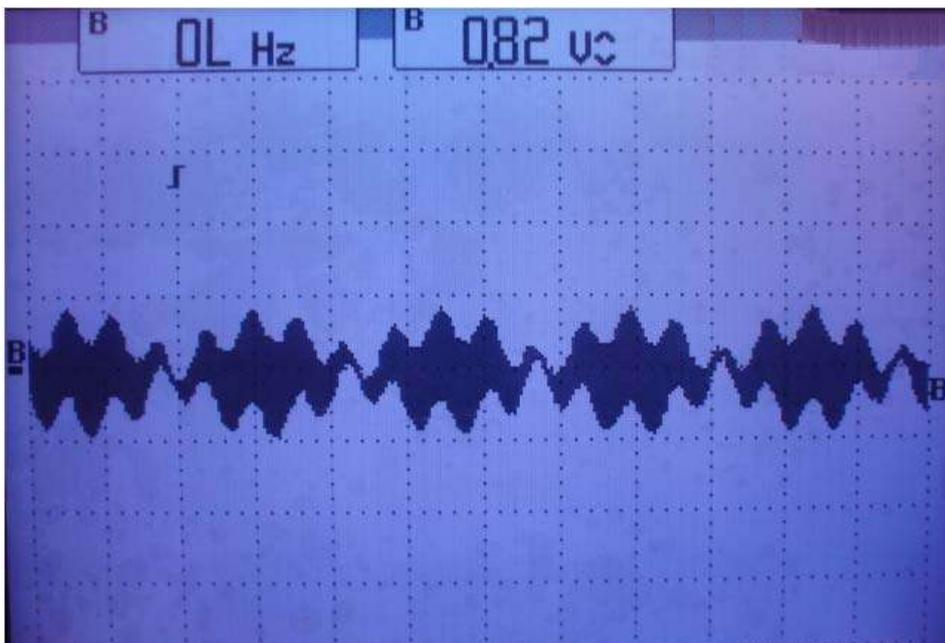


Figura 4.30. Señal filtrada y amplificada con una ganancia de once.

La segunda etapa se le da nuevamente una ganancia de siete para así, dar una ganancia total de dieciocho a la salida del receptor, Figura 4.31.

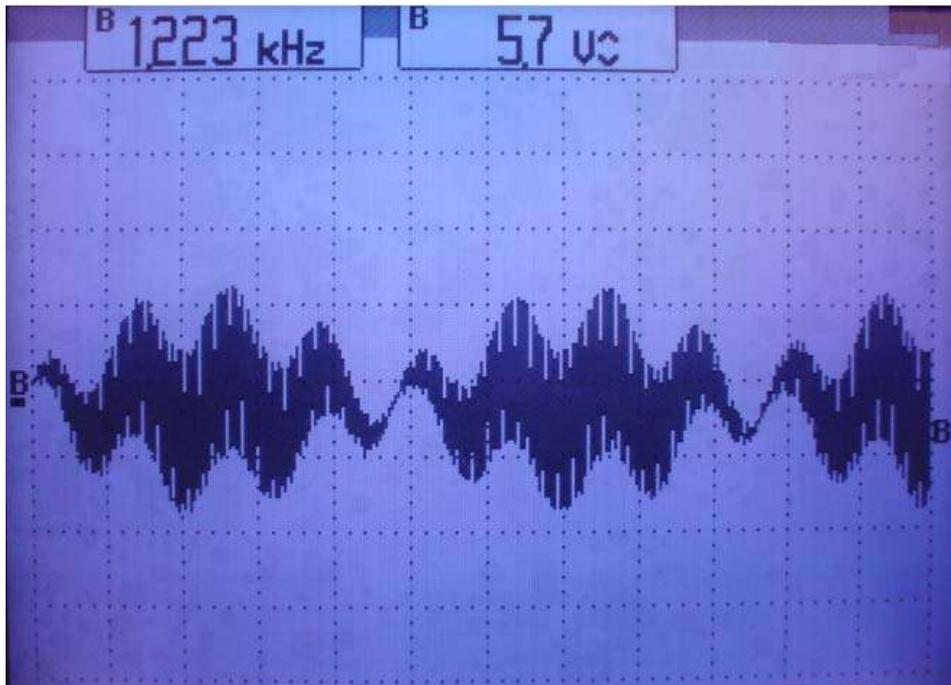


Figura 4.31. Señal amplificada con una ganancia de dieciocho.

En la Figura 4.32 se compara la señal enviada y la señal recibida, donde se concluye que se tiene una buena calidad de transmisión, ya que ambas son idénticas.

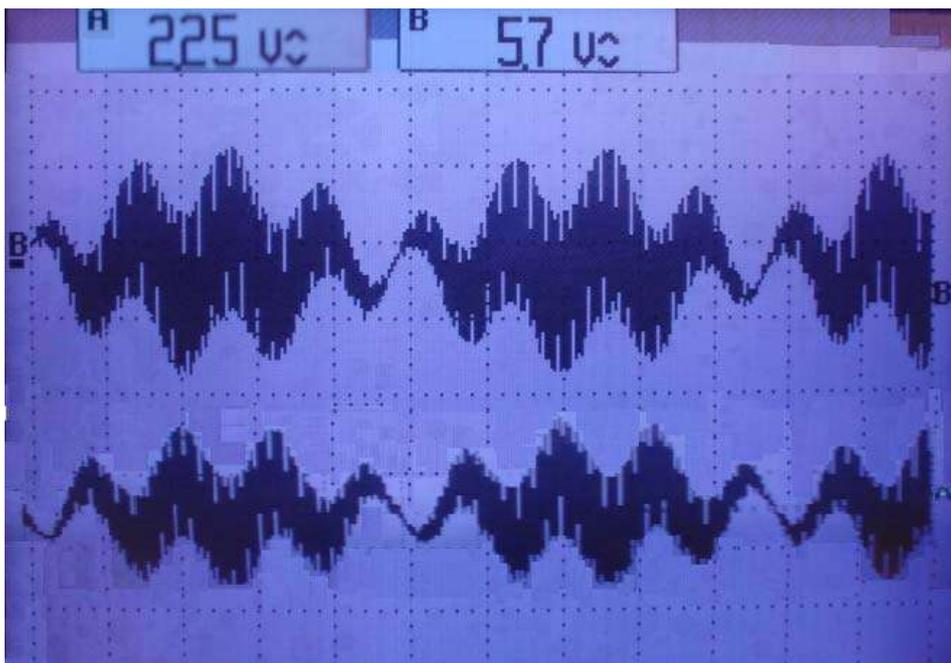


Figura 4.32. Señales comparadas.

Se hace notar que las pocas pérdidas que hay son debido al enlace entre el transmisor óptico y la fibra óptica, en la etapa de transmisor y al enlace entre receptor óptico y la fibra óptica, en la etapa de receptor.

4.2.7 Señal de Salida del Filtro Pasa-Banda

Es la etapa donde se lleva a cabo la separación de la señal compuesta en las tres señales moduladas, como lo muestra la Figura 4.33.

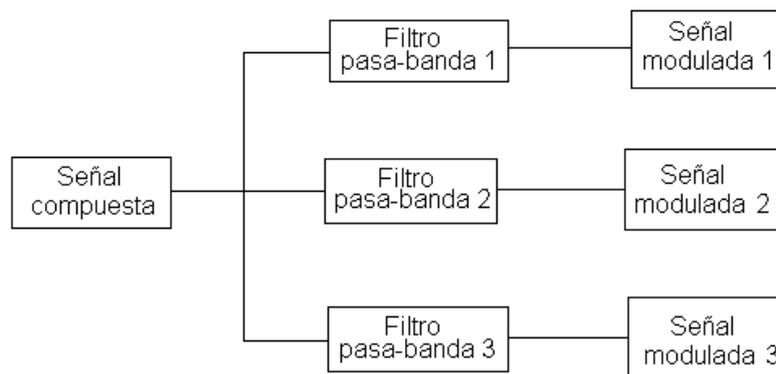


Figura 4.33. Diagrama de bloques de los filtros pasa-banda.

La respuesta del filtro pasa-banda a 800Hz se muestra en la Figura 4.34 a), la señal después del filtro pasa-banda se compara con la señal modulada en la Figura 4.34. b)

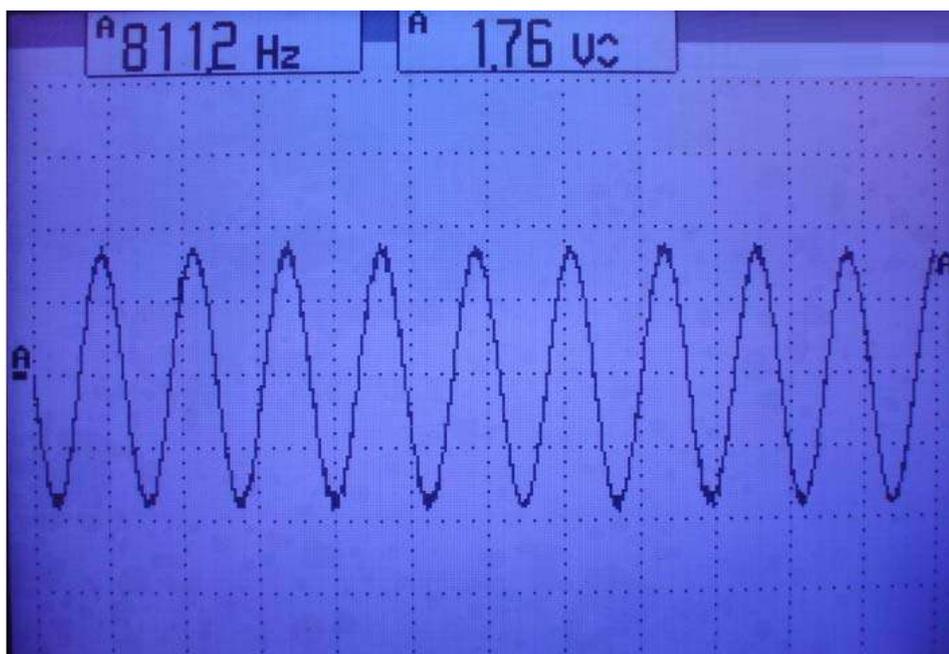


Figura 4.34. a) Señal de filtro pasa-banda a 800Hz.

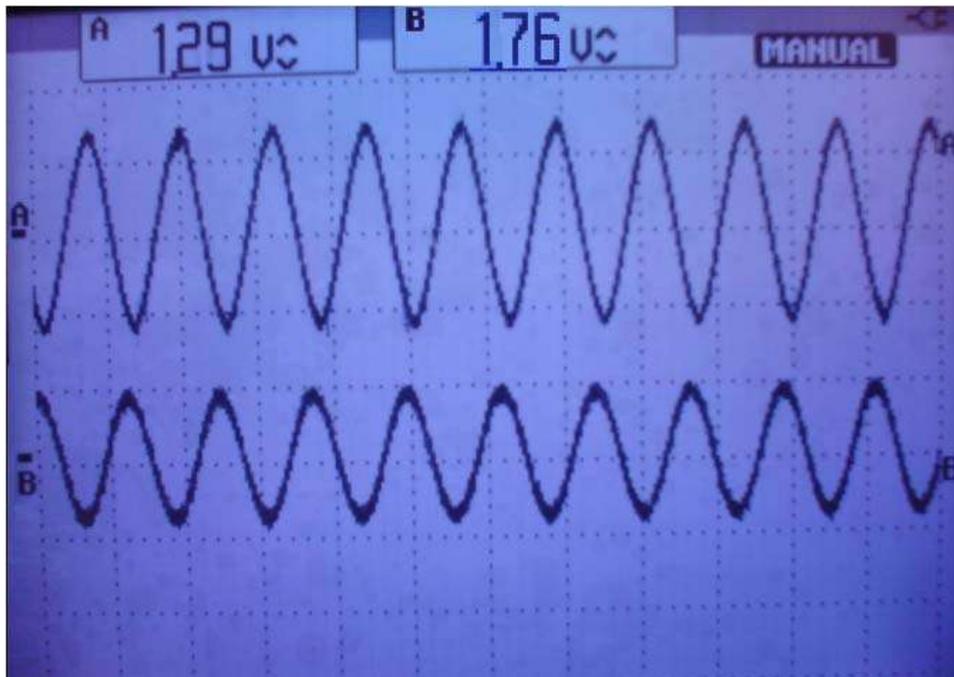


Figura 4.34 b) Comparación de señales del filtro pasa-banda a 800Hz.

La respuesta del filtro pasa-banda a 10kHz se muestra en la Figura 4.35 a), la señal después del filtro pasa-banda se compara con la señal modulada en la Figura 4.35 b)

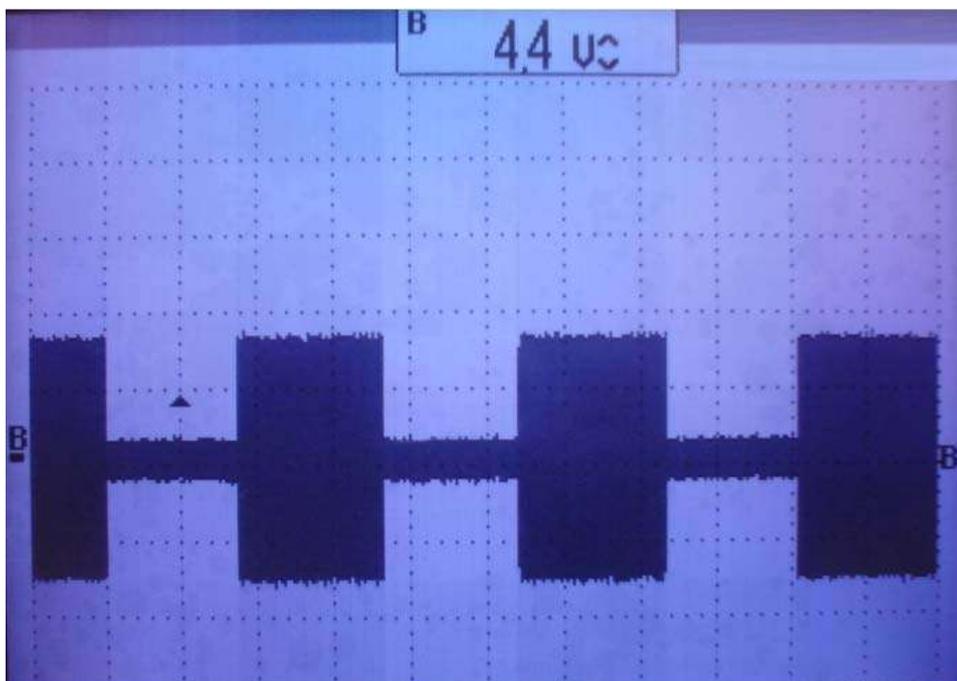


Figura 4.35 a) Señal de filtro pasa-banda a 10kHz.0

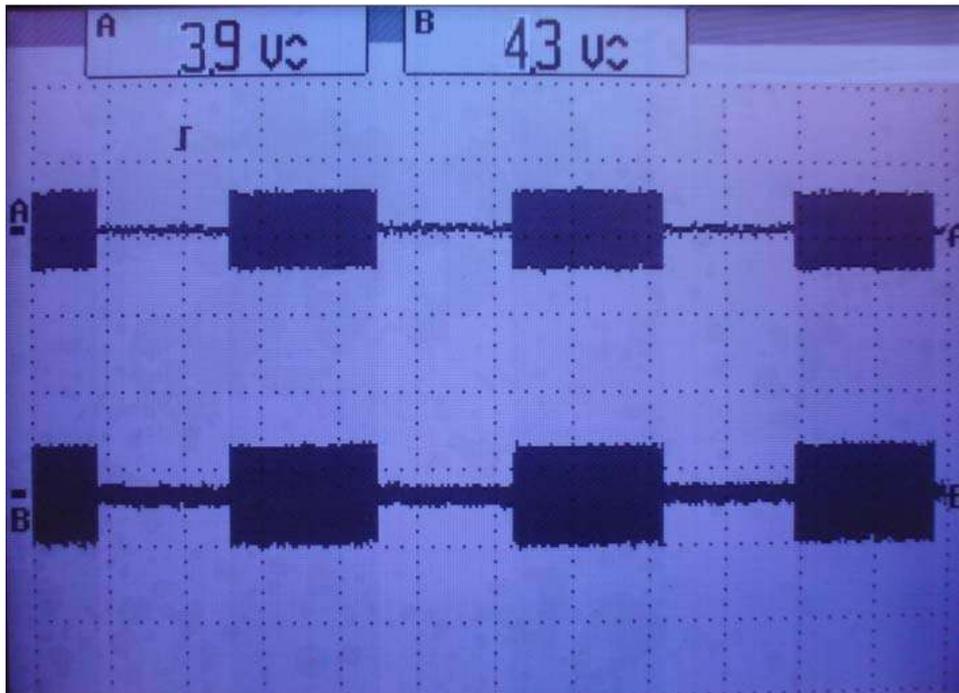


Figura 4.35 b) Comparación de señales del filtro pasa-banda a 10kHz.

La respuesta del filtro pasa-banda a 15kHz se muestra en la Figura 4.36 a), la señal después del filtro pasa-banda se compara con la señal modulada en la Figura 4.36 b)

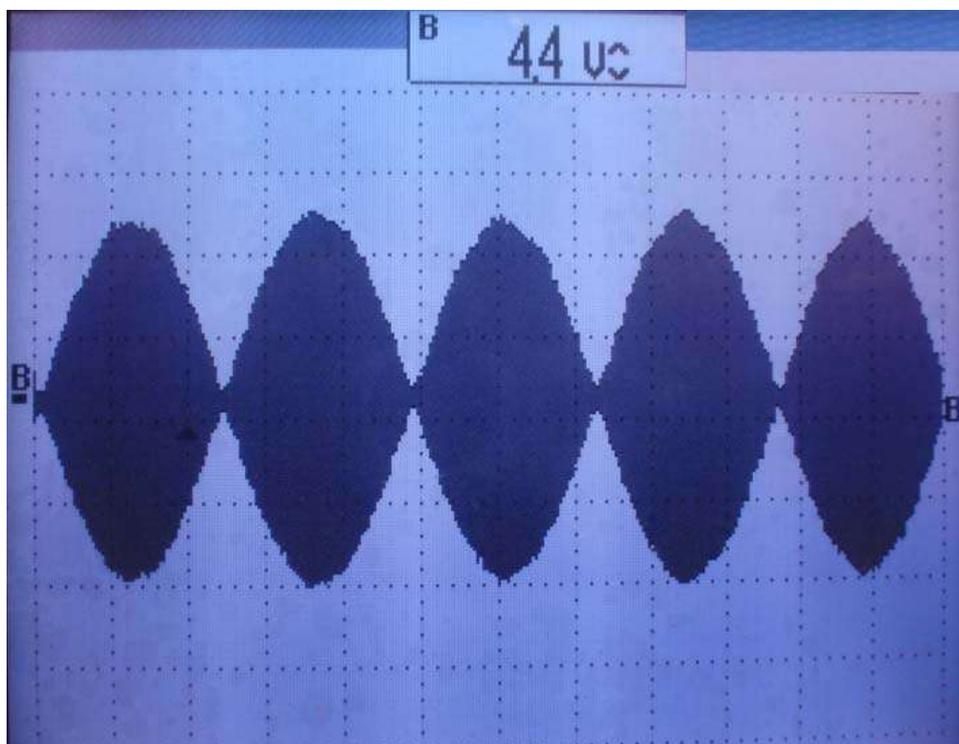


Figura 4.36 a) Señal de filtro pasa-banda a 15kHz.

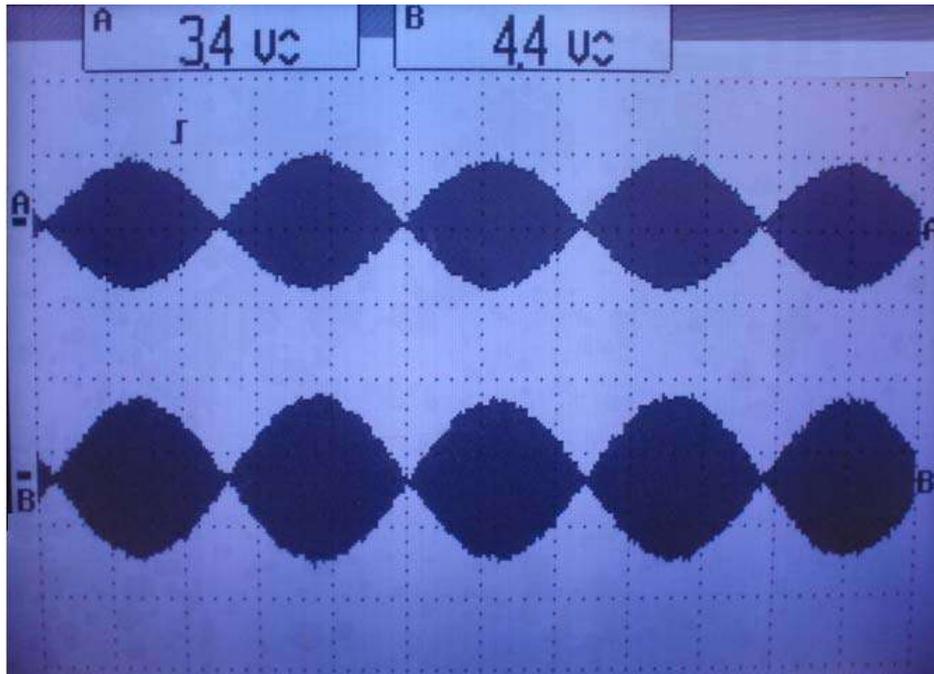


Figura 4.36 b) Comparación de señales del filtro pasa-banda a 15kHz.

Se observa que las señales obtenidas después de los filtros pasa-banda son semejantes a las señales moduladas de la etapa de transmisión, demostrando el correcto funcionamiento de los filtros pasa-banda.

4.2.8 Demodulación de Señales

La demodulación es el proceso mediante el cual se logra la recuperación de la señal modulante. La Figura 4.37 muestra un diagrama de bloques de la primera etapa de la demodulación.

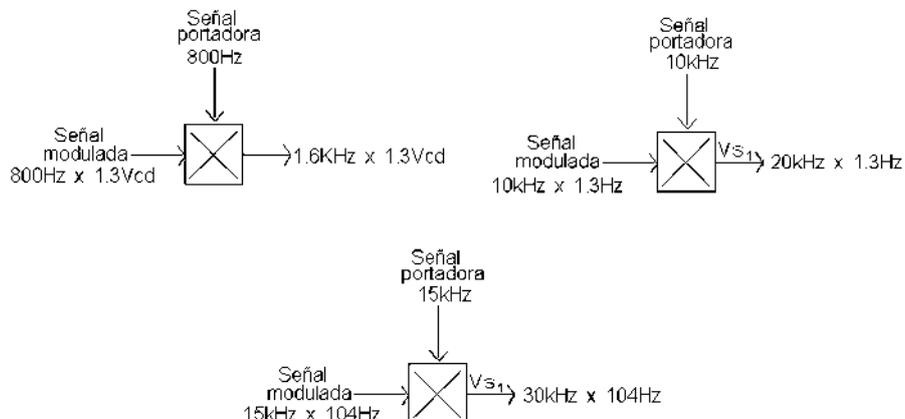


Figura 4.37. Diagrama de bloques de la demodulación.

La Figura 4.38 muestra la señal de salida del multiplicador analógico de la señal modulada a 800 Hz, donde se observa una señal de doble frecuencia de la portadora que es de 1.6kHz sobre la señal de cd.

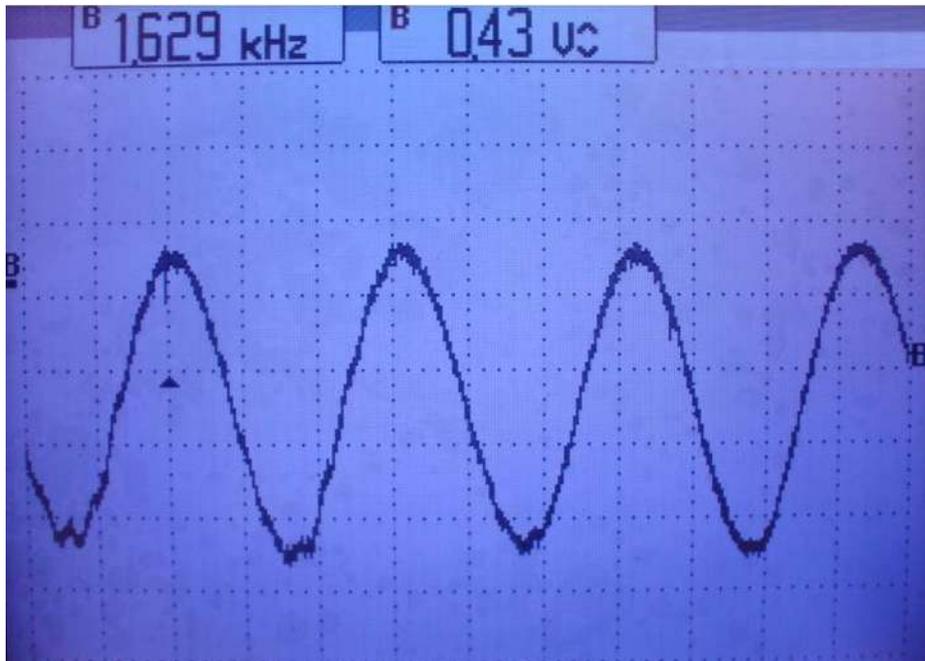


Figura 4.38. Señal de 1.6kHz sobre la señal de cd.

La Figura 4.39 muestra la señal de salida del multiplicador analógico de la señal modulada a 10kHz, observándose una señal de 20kHz sobre la señal cuadrada de 1.3Hz.

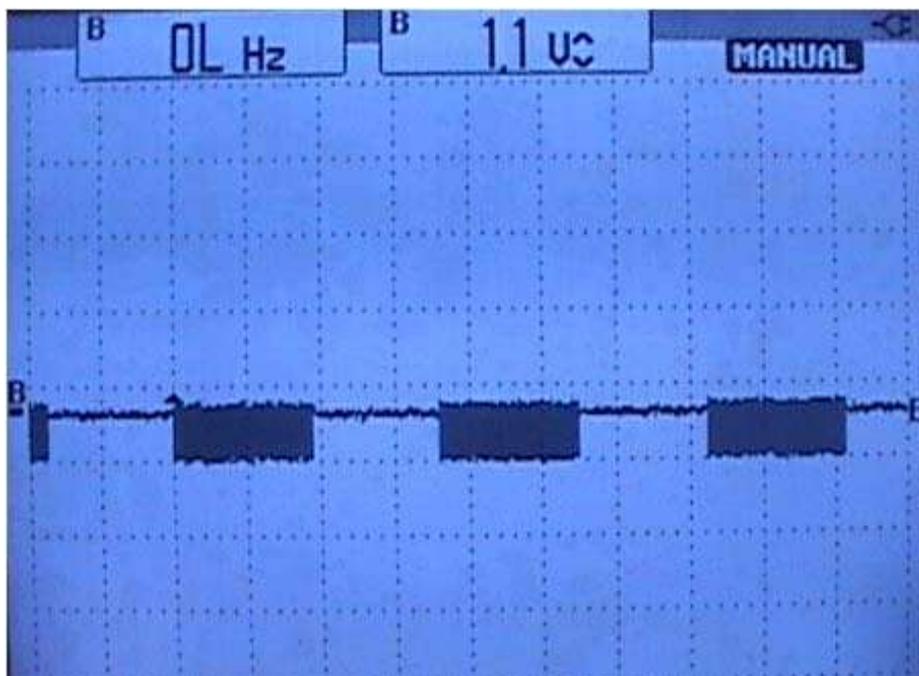


Figura 4.39. Señal de 20kHz sobre la señal de 1.3Hz.

La Figura 4.40 muestra la señal de salida del multiplicador analógico de la señal modulada a 15kHz, observándose una señal de 30kHz sobre la señal senoidal de 104Hz.

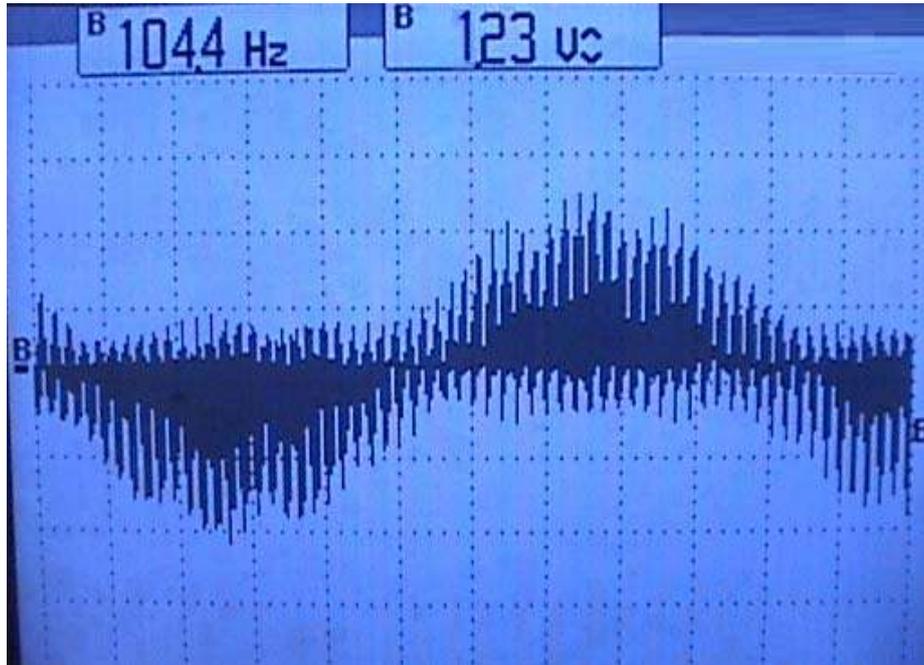


Figura 4.40. Señal de 30kHz sobre la señal de 104Hz.

Como se mencionó en la sección 3.8.4, la señal de salida del multiplicador es débil, debido al factor de escala K ($1/10$), y por lo tanto, se le dio una ganancia de menos cinco. La Figura 4.41 muestra las señales amplificadas.

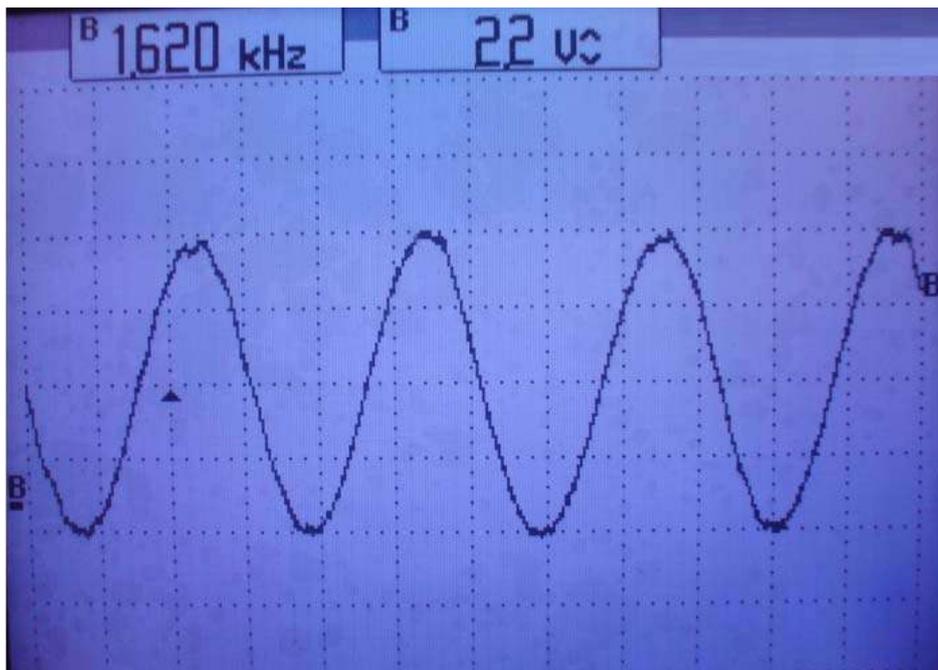


Figura 4.41a) Señal de 1.6kHz sobre la señal de cd con ganancia de menos cinco.

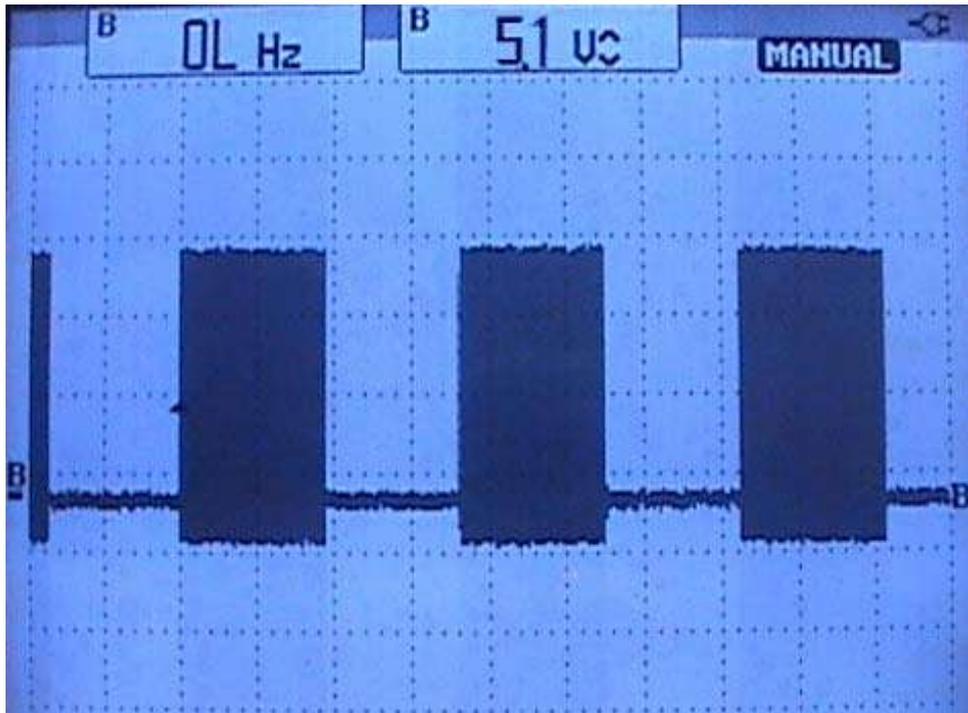


Figura 4.41b) Señal de 20kHz sobre la señal de 1.3Hz con ganancia de menos cinco.

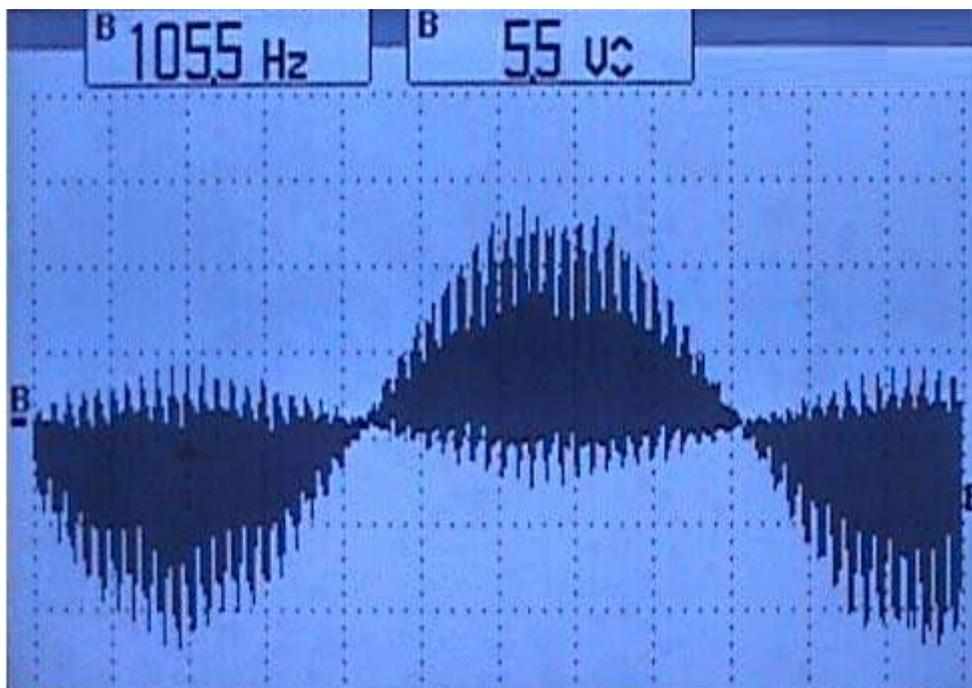
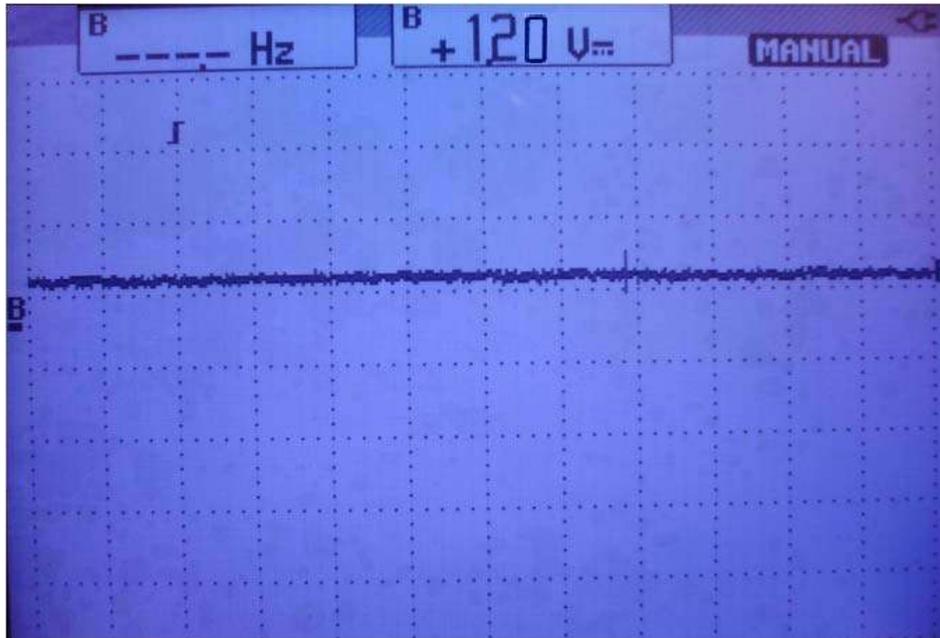


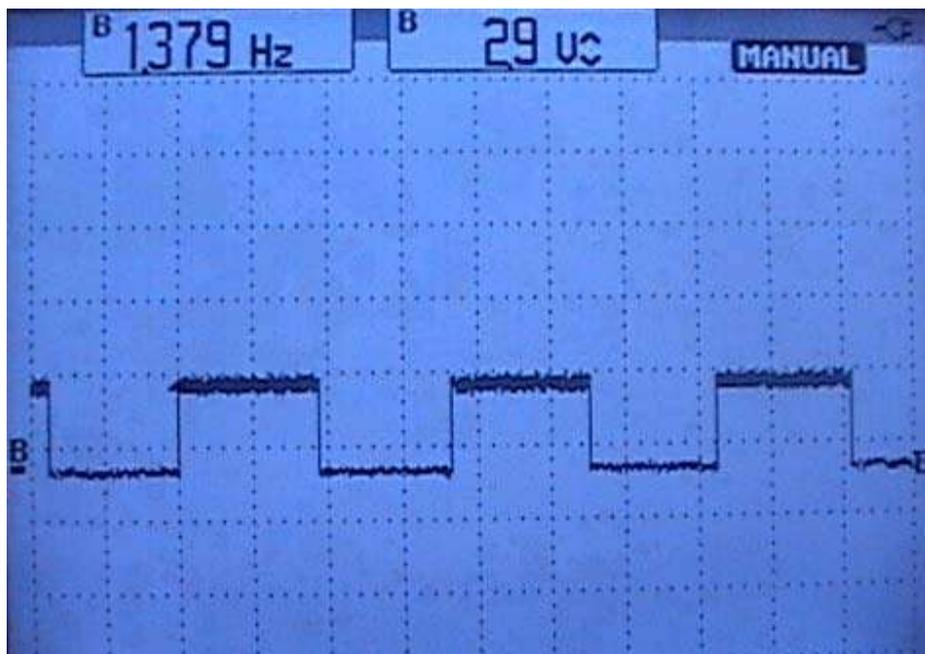
Figura 4.41c) Señal de 30kHz sobre la señal de 104Hz con ganancia de menos cinco.

4.2.9 Filtro Pasa-Bajas

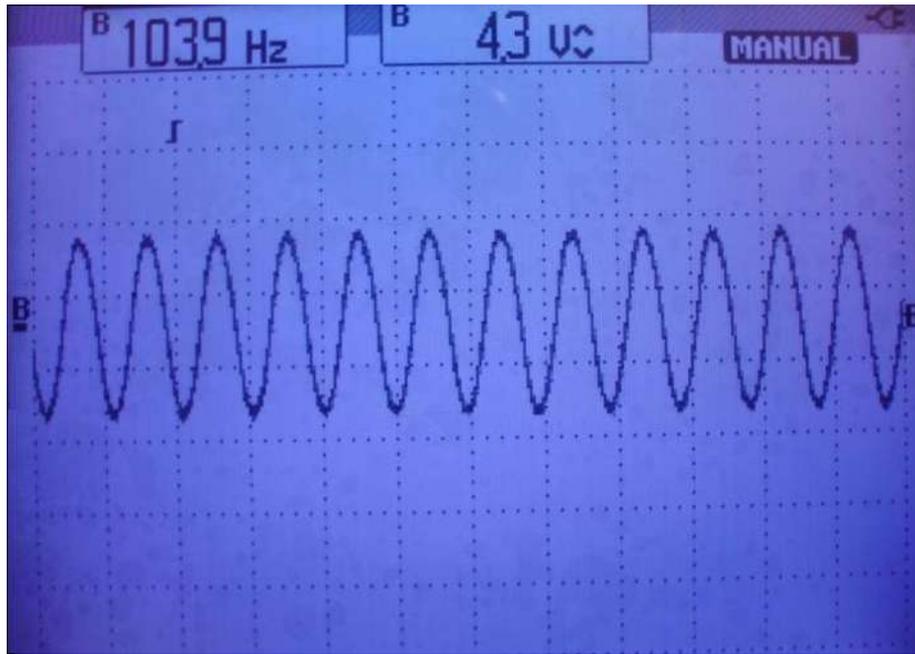
La segunda etapa es el filtro pasa-bajas el cual elimina la componente de doble frecuencia generada por la multiplicación para la demodulación, obteniendo así, la señal original transmitida. Las Figuras 4.42, 4.43 y 4.44 muestran las señales después del filtro, demostrándose que son las señales originales transmitidas.



Figuras 4.42. Señal de cd.



Figuras 4.43. Señal de cuadrada.



Figuras 4.44 Señal senoidal.

4.3 Comparativa de Señales Transmitidas y Recibidas

Como se nota en las Figuras 4.42-4.44, las señales de salida de los filtros pasabajas son menores en magnitud de voltaje que las señales envolventes, por lo que fue necesario una ganancia calculada experimentalmente, dando como resultado una magnitud de voltaje más cercana a la señal original. La Figura 4.45 muestra la señal de cd recibida.

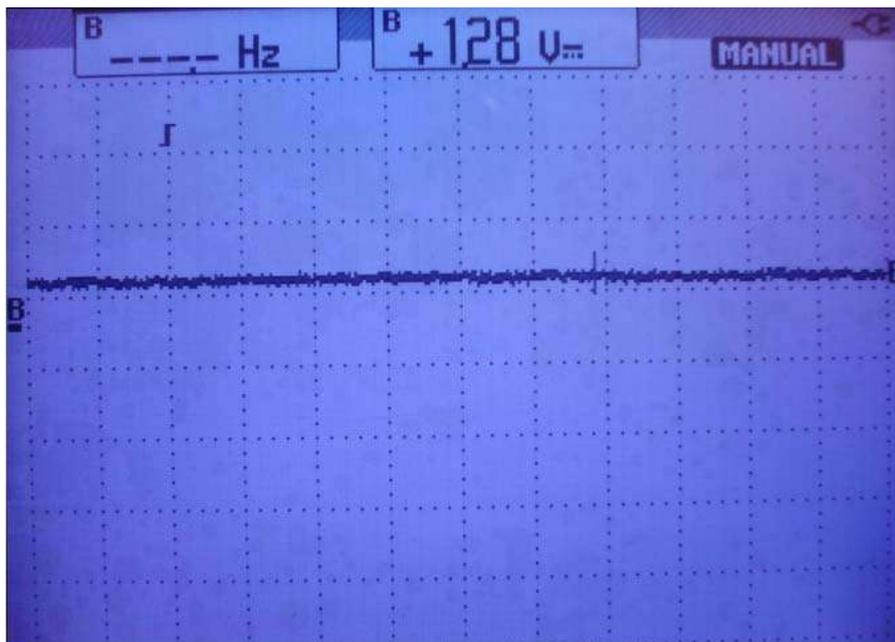


Figura 4.45. Señal de cd recibida.

La Figura 4.46 muestra la señal de cd enviada y la señal recibida.

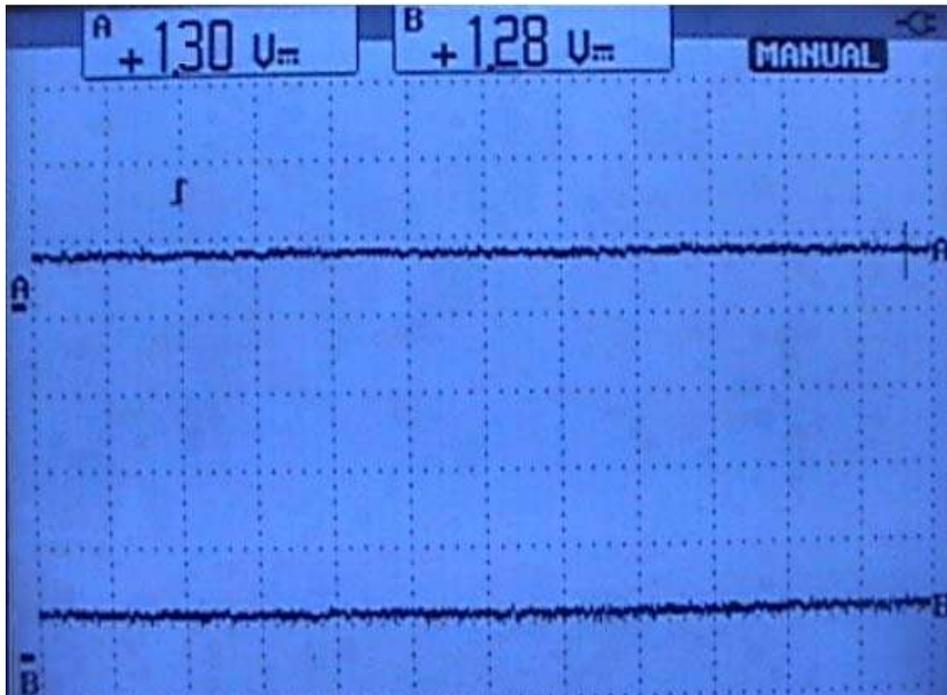
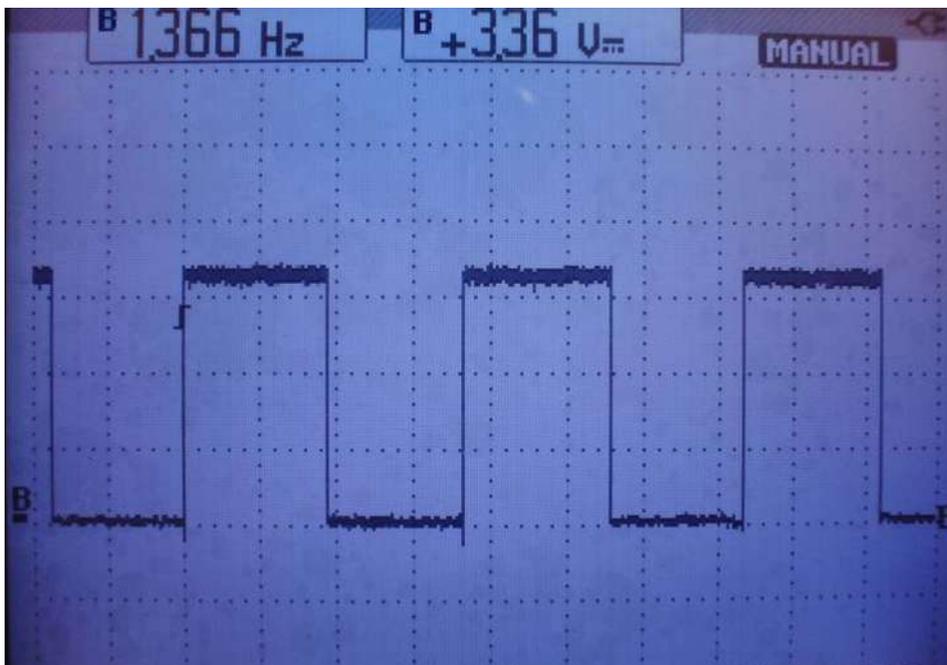


Figura 4.46. Señal de cd enviada y recibida.

La Figura 4.47 muestra la señal recibida de 1.3Hz.



La Figura 4.47. Señal de 1.3Hz recibida.

La Figura 4.48 muestra la señal de 1.3Hz enviada y recibida.

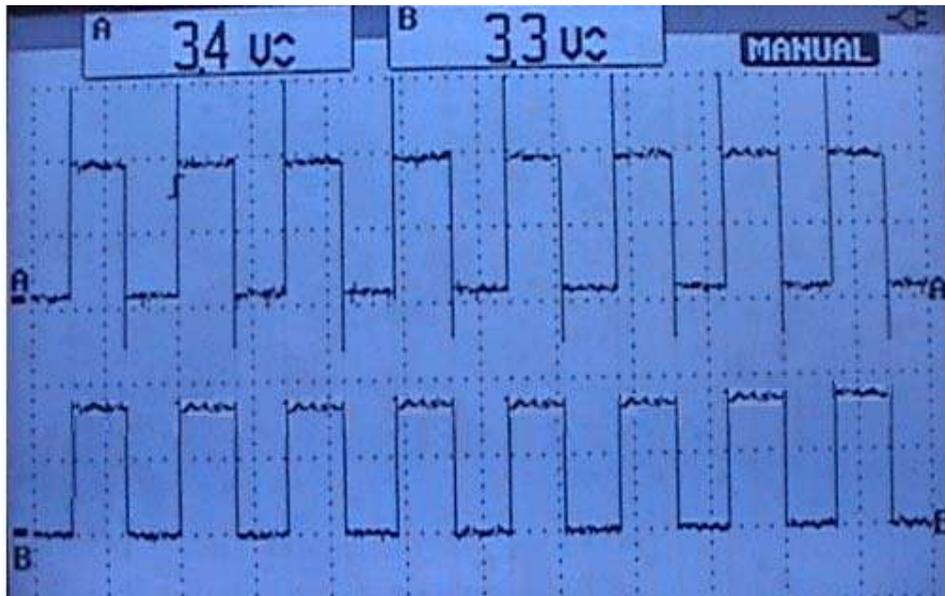
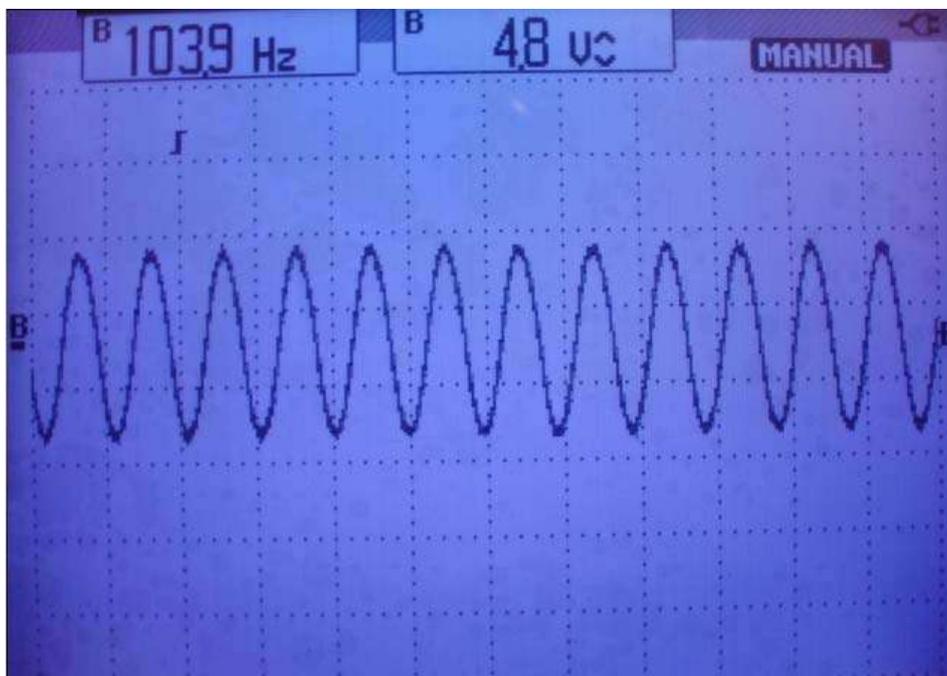


Figura 4.48. Señal cuadrada de 1.3Hz enviada y recibida.

La Figura 4.49 muestra la señal recibida de 104Hz.



La Figura 4.49. Señal senoidal de 104Hz recibida.

La Figura 4.50 muestra la señal de 104Hz enviada y recibida.

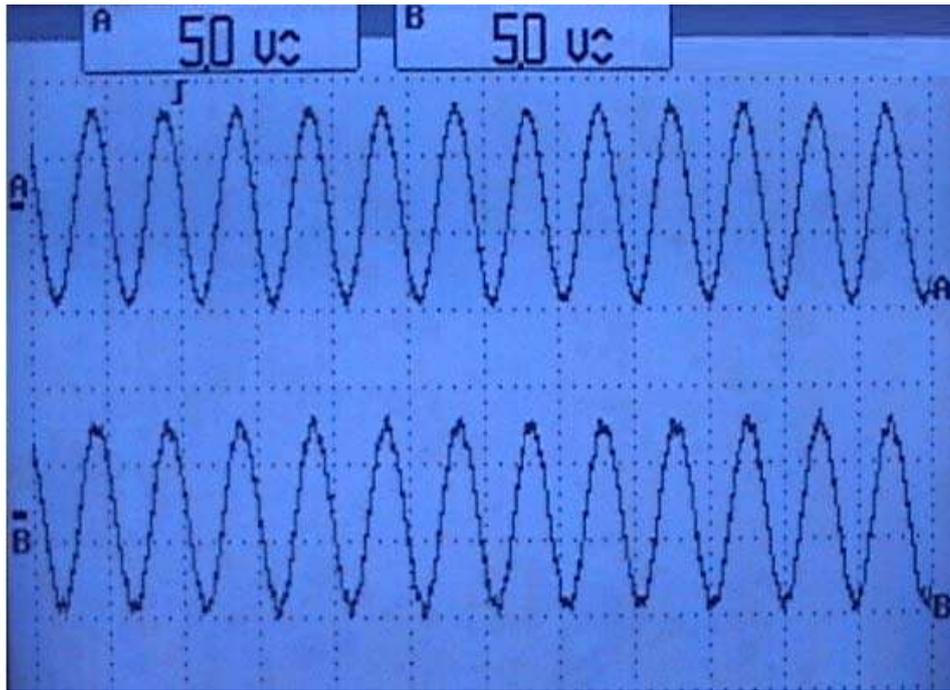
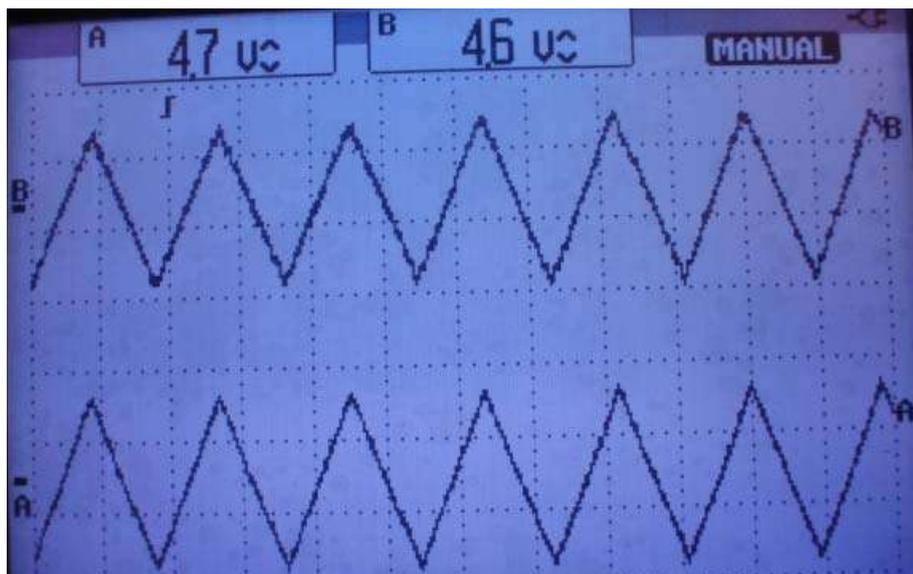


Figura 4.50. Señal senoidal de 104Hz transmitida y recibida.

4.4 Otras Pruebas

A continuación se presentan otros ejemplos donde se envían diferentes señales a diferentes magnitudes, diferentes frecuencias y diferentes tipos de onda. La Figura 4.51 muestra una señal diente de sierra por transmitir y su señal recibida.



La Figura 4.51. Señal diente de sierra transmitida y recibida.

La Figura 4.52 muestra una señal cuadrada de 20Hz transmitida y recibida.

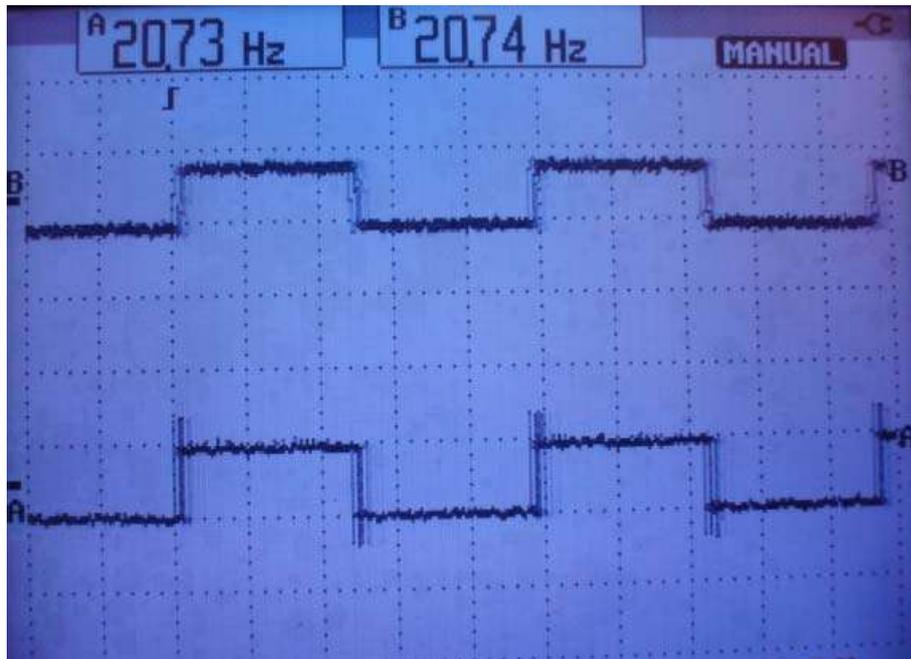
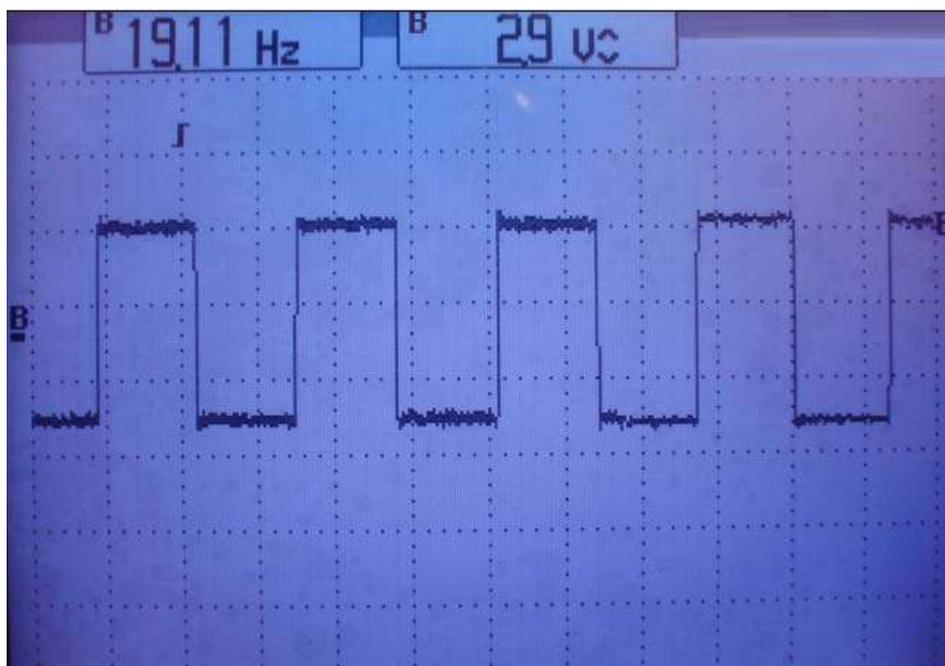
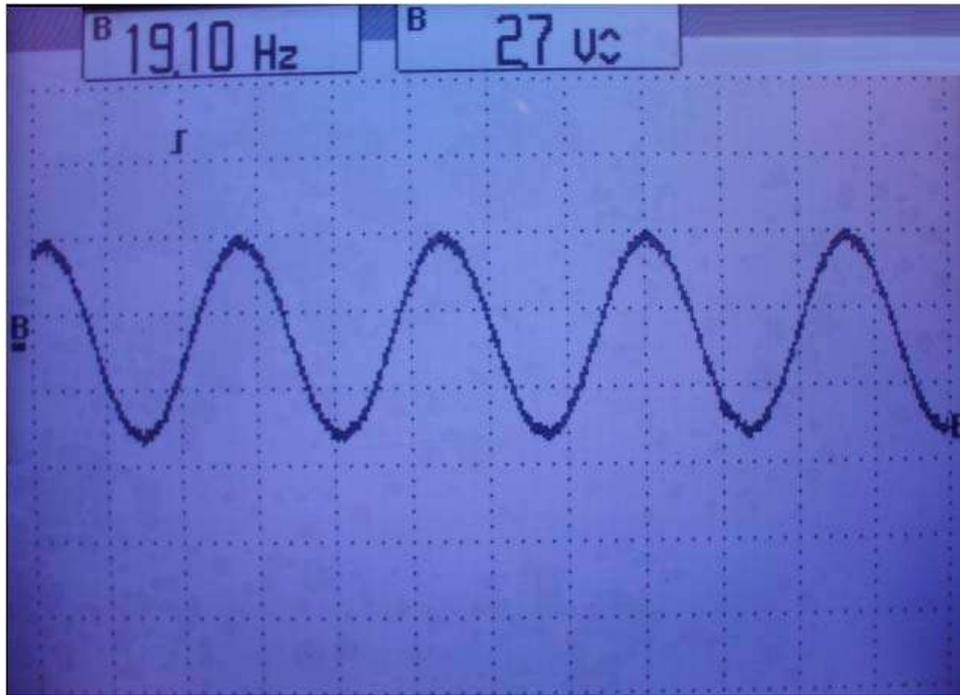


Figura 4.52. Señal cuadrada de 20Hz.

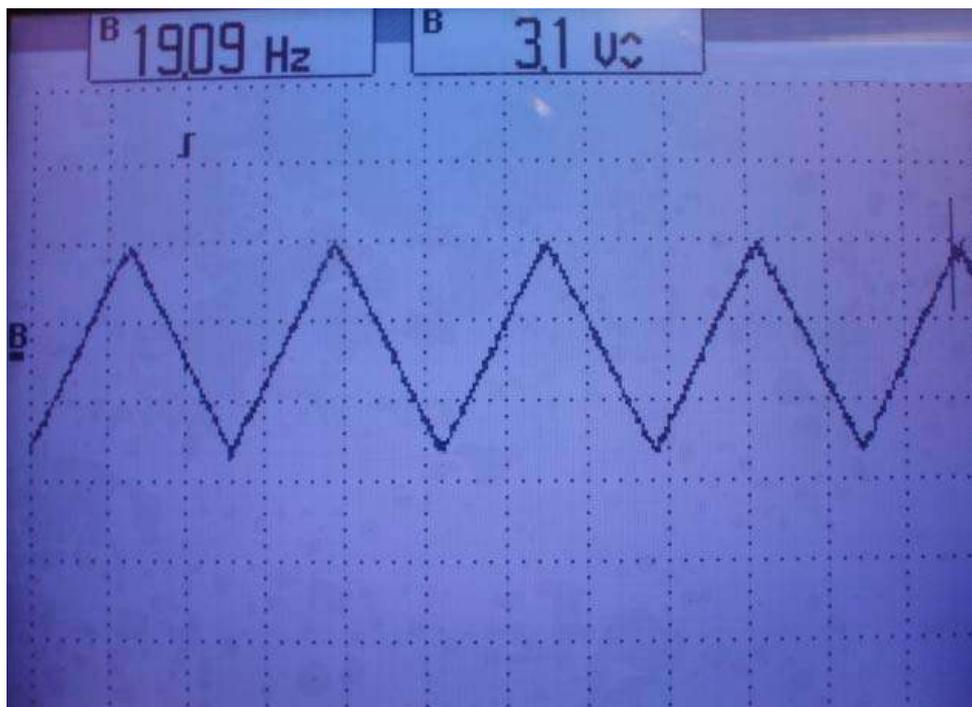
La Figura 4.53 muestra una señal recibida de 19Hz y 3 Vpp, donde únicamente se cambia el tipo de onda.



a) Señal cuadrada recibida.



b) Señal senoidal recibida.



c) Señal diente de sierra recibida.

Figura 4.53. Señales transmitidas con diferentes tipos de onda.

La Figura 4.54 muestra las señales recibidas de diferente frecuencia de una onda diente de sierra y una señal cuadrada.

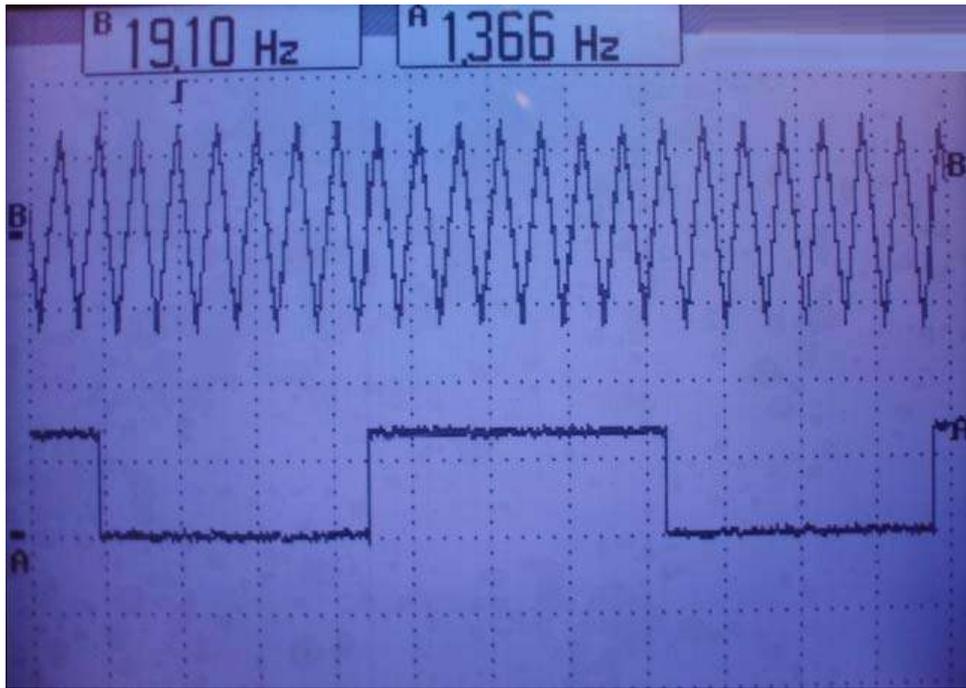


Figura 4.54. Señal diente de sierra y señal cuadrada.

Como se mencionó, la transmisión de señales moduladas multiplexadas en frecuencia tiene una buena calidad de comunicación, en señales senoidales, cuadradas, diente de sierra y de cd; lo que quedo demostrado con las pruebas hechas en el trabajo de tesis.

CAPITULO 5

Conclusiones

5.1 Conclusiones

Las conclusiones de este trabajo de tesis para transmisión de un conjunto de señales multiplexadas en frecuencia utilizando como medio de transmisión una fibra óptica se enuncian a continuación:

- La respuesta del sistema es lineal, siempre y cuando, este dentro del rango de operación.
- El proyecto esta orientado a transmitir señales de baja frecuencia en el rango de voltaje de 1Vpp a 5Vpp, las señales pueden ser diferenciales o respecto a tierra.
- Se puede transmitir tres señales de manera simultánea.
- Se tiene aislamiento eléctrico, debido a la naturaleza de la fibra óptica de transportar la energía en forma de luz, por lo tanto, la fibra óptica puede ser instalada en una línea de distribución o cerca de cualquier campo electromagnético y se garantiza que no existirá distorsión.
- El trabajo se puede extender a un gran número de señales sin que se exceda el rango de operación.
- Este trabajo consiste en proponer un prototipo de transmisión de señales utilizando fibra óptica, así mismo, este sistema se puede aumentar el diseño a más de tres señales a transmitir y recibir; en este caso sólo se requiere seleccionar de manera adecuada la frecuencia de la señal portadora que modula y demodula la señal transmitida, siendo esta frecuencia, la misma para el filtro pasa-banda.
- Este trabajo de tesis puede ser utilizado actualmente para el laboratorio de comunicaciones del plan actual de la Facultad de Ingeniería Eléctrica.
- Finalmente, este proyecto puede ser utilizado en un sistema de instrumentación por su característica de ser inmune a la interferencia electromagnética en su canal de transmisión o por la necesidad de transmitir un conjunto de señales.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Jean Pierre Nérou, Introducción a las Telecomunicaciones pro Fibra Óptica, Editorial Trillas.
- [2] Wayne Tomasi, Sistemas de Comunicaciones Electrónica, Editorial Prentice Hall, Segunda edición.
- [3] Robert F. Coughlin, Fredeick F.Driscoll, Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados Lineales, editorial Pearson, Cuarta Edición.
- [4] Gerd Keiser, Optical Fiber Communications, Mc, Graw-Hill Internacional Edition Second Edition.
- [5] John M. Senior, Optical Fiber Communication, Editorial Prentice may, 1992.
- [6] Chai Yeh, Handbook, of Fiber Optics Theory and Applications, Academia Press, Inc., 1990.
- [7] J. Michael Jacod, Industrial Control Electronics, Prentice Hall.
- [8] Hewlett Packard, Optoelectronics Designer`s Catalog, 1991-1992.

APENDICE A

Especificaciones Eléctricas del ICL8038.

Parametro	Simbolo	Mínimo	Máximo	Unidad
Rango de voltaje de alimentación	V_{supply}			
	$V+, V-$	10	30	
	$V+, V-$	-5	-15	V
Corriente de alimentación	I_{supply}		20	ma
Caraterísticas de frecuencia				
Máxima frecuencia de ascilación	f_{max}	100		V
Características de salida				
Onda senoidal				
Amplitud	V_{sine}	0.2		xV_{supply}

APENDICE B

Especificaciones Eléctricas del Multiplicador de Señales AD534J.

Parámetro	Típico
Función de transferencia	$\frac{(X_1 - X_2)(Y_2 - Y_1) + Z_2}{10V}$
Error total (-10V < X, Y < +10V)	Máximo ±10%
Error total Vs Temperatura	-+ 0.022%/ °C
Error del factor de escala (SFV=10V nominal)	-+ 0.25%
Rechazo de suministro (15V, 1V)	-+0.01%
No linealidad: X(X=20 Vpp, Y=10V1) Y(Y=20 Vpp, X=10V1)	-+0.4% -+0.4%
Voltaje de desviación de entrada	-+5mV
Ancho de banda	3MHz
Velocidad de cambio	20V/μseg
Tiempo de establecimiento (a 1% Vout=20V)	2μseg
Densidad de ruido espectra SF=10V	0.8μV/Hz ^{0.5}
Ruido en el ancho de banda f=10Hz a 5MHz f=10Hz a 10kHz	1mV/seg 90μV/seg
Impedancia de salida(f<1kHz)	0.1Ω
Corriente de corto circuito	30mA
Rango de voltaje diferencial	-+12V
Voltaje de desviación X,Y	-+5mV
Voltaje de desviación Z	-+5mV
Relación de Rechazo de modo común	80dB
Corriente de polarización de entrada	0.8μA
Corriente de desviación de entrada	0.1μA
Resistencia diferencial	10MΩ
Rango de temperatura Operación Almacenamiento	0 a + 70°C -65°C+ 150°C

APENDICE C

Especificaciones de Operación del Transmisor Óptico HFBR-1402.

Parametro		Simbolo	Mínimo	Máximo	Unidad
Temperatura de almacen		Ts	-55	85	°C
Temperatura de operación		Ta	-40	85	°C
Ciclo de soldadura	Temperatura			260	°C
	Tiempo			10	seg
Corriente de entrada	Pico	Ippk		200	mA
	DC	Ifdc		100	mA
Voltaje de entrada		Vbr		1.8	V

APENDICE D

Especificaciones de Operación del Receptor Óptico HFBR-2404.

Parametro		Simbolo	Mínimo	Máximo	Unidad
Temperatura de almacen		Ts	-55	85	°C
Temperatura de operación		Ta	-40	85	°C
Ciclo de soldadura	Temperatura			260	°C
	Tiempo			10	seg
Voltaje de salida		Vs	-0.5	1	V
Voltaje de alimentación		Vcc	-0.5	7	V