

111
2eq.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

**PROTOTIPO DE MODEM PARA TRANSMISION
Y RECEPCION DE VOZ Y DATOS DE BAJA
VELOCIDAD A TRAVES DE LA LINEA DOMESTICA
DE CORRIENTE ALTERNA**

**T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
AREA ELECTRICA ELECTRONICA**

**P R E S E N T A :
BERNARDO MARQUEZ VILCHES**

DIRECTOR: M.I. VICTOR M. TORRES GODINEZ



MEXICO 1997

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedico esta tesis con todo mi amor y cariño a todos los que han estado cerca de mí todo el tiempo y que son testigos de este esfuerzo:

Ale, mi Mamá, mi Papá, Lore (y el Edus), Charlie, Mónica y Rodrigo, mis Abuelos y mi Abue Miné (los mejores ejemplos de sabiduría y experiencia), mis hermanos (Jorge, Piri y Mau), mis primos y tíos (los Caballero Vilches, los Vilches Castillo y los Jiménez Vilches), Schehere, Pola (mi Suegra), Gustavo (mi Suegro), los Puente, los Cervantes y Adolfo, Karina y Antonio, Mariuz y Pedro, Susy, Diana, Anouk, Elisa, Soileh, Carla, Lau, Adriana, Ana Patricia, Claudia y Víctor, Pilar y Carlos, Vargas, Zuñi, Monsi, Lalo, Silvia, Gaby, Eric, Alejandro y Alonso, todos los de Intec, Víctor Torres (mi paciente director), la UNAM (mi *Alma Mater*) y Ale (mi inspiración).

Espero seguir haciendo mucho con ustedes y para ustedes toda mi vida.

Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería
México, D.F.
Junio de 1997

Índice

<u>Capítulo</u>	<u>Página</u>
Introducción	1
I) Generalidades de Dispositivos Módems	1
II) Estructura General de un Módem por Inducción en Línea de Alimentación Doméstica de Corriente Alterna	3
II.a) Características de la línea doméstica de A.C.	3
II.b) Ventajas y desventajas de usar a la señal de alimentación doméstica como señal portadora	5
II.c) Etapas que componen a un módem por inducción en línea de alimentación doméstica	7
III) Principio de Operación del Módem por Inducción en Línea de Alimentación Doméstica	12
IV) Características Magnéticas del Núcleo del Transformador Empleado en los Módems	15
V) Requerimientos para Transmisión de Voz	20
V.a) Transductores	20
V.b) Acondicionadores	22
V.c) Elementos de Acoplamiento y Aislamiento	23
VI) Requerimientos para Transmisión de Datos	25
VI.a) Codificación	25
VI.b) Modulación digital	26
VI.c) Acondicionadores	28
VI.d) Elementos de acoplamiento y aislamiento	28
VII) Diseño de las Etapas para Transmitir / Recibir Voz	29
VII.1) Etapas Transductores (Entrada/Salida)	29
VII.2) Etapas de Acondicionamiento	31
a) Proceso de Transmisión	32
b) Proceso de Recepción	38
VII.3) Etapas de Acoplamiento	46
VIII) Diseño de las Etapas para Transmitir / Recibir Datos	49
VIII.1) Etapas de Acondicionamiento	49
VIII.2) Circuitos para Identificación de los Usuarios	53
VIII.3) Etapas de Demodulación	54
VIII.4) Etapas de Acoplamiento	57
IX) Construcción del Prototipo	59
X) Pruebas y Conclusiones	60
Apéndice A	
Apéndice B	
Apéndice C	
Bibliografía	

Introducción

La necesidad de estar constantemente comunicado es parte de la naturaleza del hombre y es por esto que se ha desarrollado una carrera universal por mejorar, facilitar y abaratar sistemas de comunicación de todos tipos: desde el teléfono que todos conocemos, que a sus 120 años de edad (Bell, 1876) sigue transformándose tanto en estructura como en funciones, hasta los sistemas de comunicación de video y sonido vía satélite capaces de enlazar dos extremos del mundo sin ninguna dificultad.

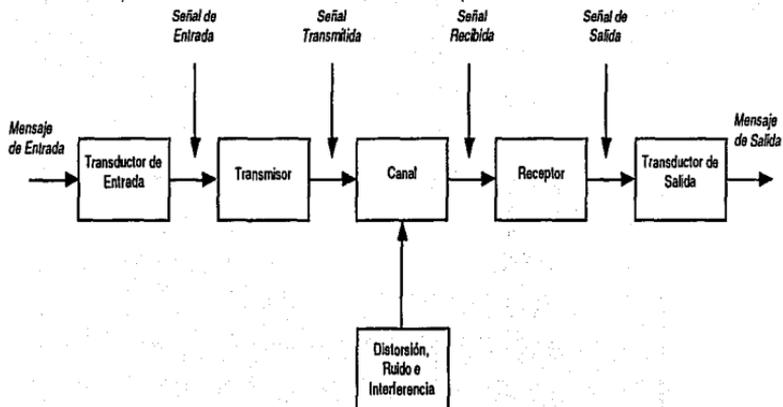
En el mismo camino del desarrollo de sistemas de comunicación se pretende hacer en esta tesis un proyecto que pueda ser de utilidad para la creación de sistemas cada vez más accesibles y prácticos. Se verán en los siguientes capítulos algunos temas relevantes acerca de los conceptos y antecedentes que se necesitaron para la planeación, desarrollo y fabricación de este prototipo que forma parte de la enorme familia de "los sistemas de comunicación".

Todos los sistemas de comunicación, en su forma más general, consisten de los siguientes componentes:

- 1) La fente que origina el mensaje que se quiere transmitir (esta información puede ser la voz, sonido, imágenes, datos, etc.).
- 2) El transductor de entrada que convierte el mensaje de su estado original a una señal de tipo eléctrico: señal de banda base.
- 3) El transmisor que modifica la señal de entrada para poder ser transmitida por algún medio. El transmisor consta de subsistemas tales como etapas de amplificación, filtrado y modulación.
- 4) El canal que es el medio por el cual viajará la señal y que generalmente está expuesto a ruido y disturbios que atacan a la señal transmitida.
- 5) El receptor que reprocesa la señal proveniente del canal al deshacer las modificaciones introducidas por el transmisor y la convierte en señal de salida. También consta de otros subsistemas como las etapas de filtrado, amplificación y demodulación.
- 6) El transductor de salida que convierte la señal de salida de tipo eléctrico en su forma original: en el mensaje.
- 7) El destinatario que es la unidad (máquina, persona o aparato) a la que se comunica el mensaje.¹

En los casos más comunes de sistemas de comunicación que conocemos (como el teléfono, la radio, la televisión, etc.), la fuente y el destinatario son el inicio y el final del sistema pero para poder enviar y recibir una señal es necesario tener intermediarios que tomen la información de la fuente (voz, música o imágenes), la adecúen para poder ser enviada, la envíen por algún medio (cables o el espacio), la reciban del mismo medio, la vuelvan a adecuar para poder entenderla y la entreguen al destinatario como él la pueda entender. Ver el siguiente diagrama de un sistema de comunicación.

¹ B.P.Lahti, Sistemas de Comunicación, Ed. Interamericana, Mexico 1986



Sistema de Comunicación

El tema de esta tesis trata precisamente de este tipo de intermediarios, nuestro "PROTOTIPO DE MODEM PARA TRANSMISION Y RECEPCION DE VOZ Y DATOS DE BAJA VELOCIDAD A TRAVES DE LA LINEA DOMESTICA DE CORRIENTE ALTERNA" que a continuación se presenta es un aparato para transmitir y recibir señales de voz y datos de computadora, utilizando como canal de transmisión la línea de corriente alterna o red eléctrica de una casa.

El objetivo de esta tesis es diseñar un aparato prototipo que sea capaz de transmitir y recibir sonido (voz) y datos (bits) utilizando la línea de AC como canal de transmisión. En ocasiones se podrá pensar en mejores opciones para un mejor funcionamiento del módem pero hay que aclarar que nuestro objetivo de proyecto no es el de fabricar un producto competitivo a nivel comercial en eficiencia, operación y tecnología, sino hacer uso de la electrónica y de la línea de corriente doméstica para transmitir mensajes de voz y de datos.

I) Generalidades de Dispositivos Módems

Un módem en general es un aparato que permite establecer cierto tipo de comunicación entre dos personas. Un módem puede servir para llamar a alguien que se encuentre en otro lugar o puede servir para enviar documentos como lo hace el "fax", y también puede servir para que dos computadoras intercambien información. El módem es el intermediario entre el origen y el destino del mensaje, es lo que permite mandar información a través de un cable telefónico, del aire o de cualquier canal de transmisión.



La palabra "módem" proviene de la contracción de "modulador" y "demodulador" (también se le conoce como "data set" cuyo significado y función son sinónimo del módem¹). Un módem es un dispositivo que realiza las funciones de transmitir y recibir información en forma de señales moduladas a través de un canal de transmisión específico, hay módems de muy diferentes tipos dependiendo del tipo de señales que transmiten y reciben, del canal de transmisión que utilizan, de la velocidad de transmisión, de la claridad de información y de la fuente y destinatario que estén usando el módem.

En su forma más básica, los módems se componen de los siguientes elementos:

1. Fuente de alimentación
2. Transmisor
3. Receptor

La **fente de alimentación** proporciona al módem la energía necesaria para hacer trabajar toda la circuitería interna. Un módem maneja señales pequeñas, o de bajo voltaje, y circuitos electrónicos para comunicaciones que requieren una fuente de alimentación que proporcione la energía necesaria para su operación.

El **transmisor**, compuesto de etapas transductoras, acondicionadoras y de acoplamiento, convierte una señal de entrada en un tipo de señal transmisible, la acopla al canal de transmisión y la transmite. En esta parte del módem es donde se encuentra el "modulador".

El **receptor**, compuesto de etapas de acoplamiento, de acondicionamiento y de transducción, recibe la señal transmitida y la convierte en el mensaje original. En esta otra parte es donde se encuentra el "demodulador".

Los sistemas de comunicación se pueden distinguir por su forma de transmitir y recibir la información. El modo de transmisión puede ser de diferentes tipos:

¹ D.G.Fink & D.Christiansen, Manual de Ingeniería Electrónica, Volumen IV.

SIMPLEX: cuando el módem solo puede transmitir o recibir datos en una sola dirección. Un ejemplo de este tipo de transmisión lo encontramos en un radio común que solamente puede recibir la señal transmitida por la estación.

HALF-DUPLEX: cuando puede transmitir y recibir datos pero no al mismo tiempo. Los "walkie-talkies" son un ejemplo de transmisión half-duplex al igual que el telégrafo.

DUPLEX: cuando el módem puede transmitir y recibir datos al mismo tiempo. El teléfono actual es el ejemplo más conocido que encontramos en nuestra época, también tenemos el interfón y sistemas de comunicación de voz abierta que utilizan este tipo de transmisión en la cual podemos hablar y escuchar al mismo tiempo.

Aparte del tipo de transmisión, el tipo de recepción puede ser de dos formas:

SINCRONA: cuando las señales transmitida y recibida tiene un mismo reloj.

ASINCRONA: cuando las señales no requieren un mismo reloj.

El canal de transmisión que conduce a la señal transmitida del transmisor al receptor cambia de un sistema de comunicación a otro. El canal es el principal factor que determina cuál es el modo óptimo de transmisión y dicta las condiciones necesarias que debe tener una señal para poder viajar a través del canal deseado.

Entre los canales de transmisión más comunes de un módem tenemos:

AIRE: en el caso de un radio o la telefonía celular.

ALAMBRE O CABLE TENDIDO: en el caso de un interfón.

CABLE COAXIAL: en el caso de una red de computadoras o de un CCTV (circuito cerrado de televisión).

CABLE TELEFONICO: en el caso de un fax-módem o un teléfono.

Actualmente existen módems para diferentes usos y de diversos tipos dependiendo de la información que transmiten, del canal que usan, del fin para el que son diseñados y de quien los utilice. Encontramos módems para comunicar a dos personas, para comunicar a dos computadoras, para comunicar una computadora con un fax y para comunicar sistemas de video y sonido con computadoras.

El prototipo de módem que se proyecta en esta tesis es un módem *half-duplex* de transmisión y recepción síncrona que trabaja en tiempo real y que utiliza como canal de transmisión la línea doméstica de corriente alterna.

NOTA: Estrictamente, "tiempo real" se refiere a conocer la información en el instante, sin retardo de procesamiento o de otra naturaleza. Nos permitimos usar este término debido a que el tiempo que transcurre entre la transmisión y la recepción se percibe instantaneo a los sentidos.

II) Estructura General de un Módem por Inducción en la Línea de Alimentación Doméstica de Corriente Alterna

En este capítulo veremos la estructura de un módem en forma general y a nivel de bloques. A continuación se describe la línea de alimentación con sus ventajas y desventajas como línea de transmisión y las etapas que componen a un módem con estas características.

II.a) Características de la línea doméstica de AC

La línea doméstica de AC es lo que conocemos como la línea de servicio eléctrico de una casa. Consta de varios alambres conductores de diversos materiales que forman cables recubiertos por aislantes de compuestos plásticos o amianto. Una instalación eléctrica también consta de terminales o tomas de corriente, switches, apagadores, interruptores, fusibles, protecciones, y transformadores, todos ellos al servicio y protección del usuario. La instalación eléctrica en cualquier domicilio es una red de cables que se tienden dentro o fuera de las paredes y que cubren prácticamente toda la casa. En condiciones normales, esta red es continua y todas las salidas o tomas de corriente son parte del mismo circuito eléctrico.

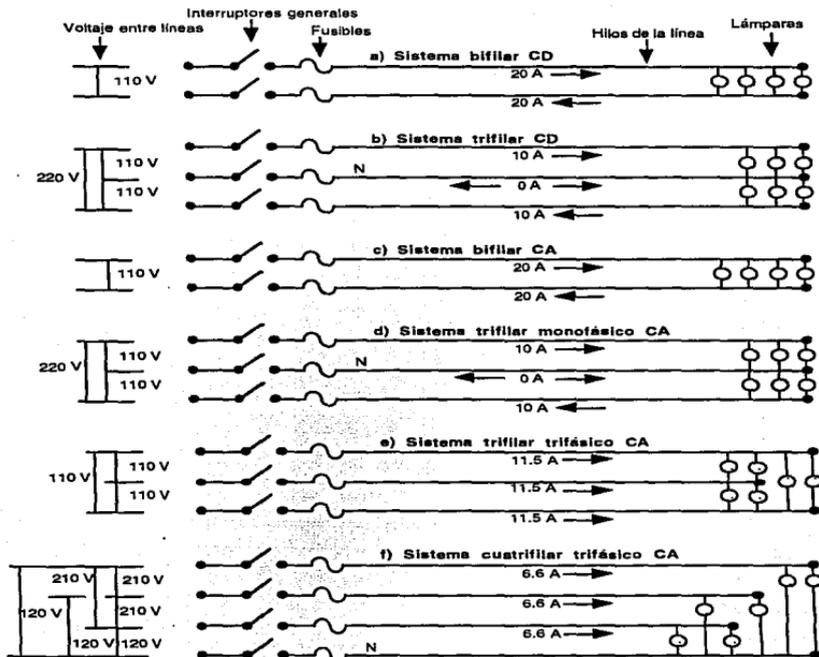
Generalmente, para una instalación convencional, los conductores son de cobre o aluminio, el voltaje que soportan es de 127 VRMS y una corriente de hasta 15 ó 20 A, para condiciones extremas de carga. Los conductores que se utilizan para una instalación eléctrica doméstica son de calibre 12 y 14, para contactos y apagadores respectivamente. La resistencia eléctrica que presenta la línea está en función del tipo de cable que se tenga y de la longitud de éste, pero podemos aproximar que está alrededor de unos 8.45 ohms/km para un cable de cobre calibre 14 y de 5.32 ohms/km para un cable de cobre calibre 12. Si en lugar de cable se tiene alambre de cobre, la diferencia de resistencia varía a 8.47 ohms/km para calibre 14 y 5.22 para calibre 12. Estos conductores son los que se usan en este proyecto como línea de transmisión a través de la cual viajará la señal modulada de un módem a otro, pero también son los que proveen la energía que alimentará a los aparatos.

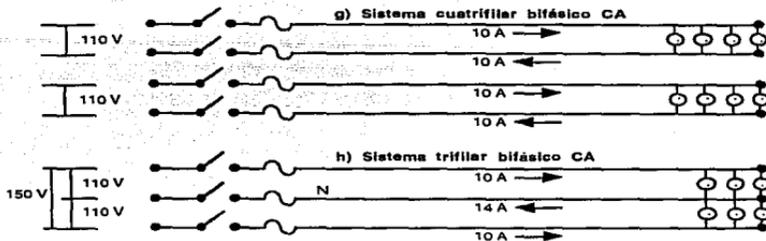
Las instalaciones eléctricas domésticas son generalmente monofásicas, pero en residencias de mayor tamaño se pueden tener instalaciones trifásicas.

Existen varios tipos de instalaciones eléctricas como los que se muestran a continuación:

- a) Sistema bifilar (para DC)
- b) Sistema trifilar (para DC)
- c) Sistema bifilar (para AC)

- d) Sistema trifilar monofásico (para AC)
- e) Sistema trifilar trifásico (para AC)
- f) Sistema cuatrifilar trifásico (para AC)
- g) Sistema cuatrifilar bifásico (para AC)
- h) Sistema trifilar bifásico (para AC)





Las viviendas, tiendas y otras construcciones pequeñas domésticas o comerciales utilizan los sistemas a, b, c ó d. El sistema a y b son de corriente directa y no son usados en las viviendas sino en instalaciones eléctricas como las del transporte colectivo Metro o para trolebuses. De los otros dos sistemas, el sistema c es claramente monofásico pero el d puede ser monofásico, bifásico o trifásico y son los más usados. Los sistemas e y f se eligen frecuentemente para grandes almacenes, edificios de oficinas y fábricas. Todas las líneas que alimentan lámparas, tomas de corriente y pequeños motores, como en cualquier vivienda, son bifilares, los sistemas g y h no son muy utilizados. Este sistema, el bifilar o monofásico, es el único justificable si se considera que los sistemas trifilares y cuatrifilares dependen de que existan cargas elevadas que requieran conductores de mucha sección y de que sean grandes las distancias a los puntos de distribución.

II.b) Ventajas y desventajas de usar la señal de alimentación doméstica como señal portadora

Un sistema de comunicación puede usar muchos medios para transmitir un mensaje, para fines de esta tesis hay que explicar lo que significa que el canal de transmisión sea la línea doméstica de corriente alterna, y esto es que el módem va a usar los cables de corriente eléctrica de la casa o edificio para mandar el mensaje a otra parte. Esto es posible gracias a que los cables son conductores, pero existe la diferencia con otros cables conductores de que por éstos circula corriente eléctrica y sucede que en un mismo cable viajarán dos señales diferentes: la señal eléctrica de 127 VCA a 60 Hz y la señal de transmisión del mensaje.

Como primer punto hay que definir que en estricto sentido y a diferencia de lo que se acostumbra decir sobre sistemas como éste, no se utiliza a la señal de alimentación como portadora, lo que se hace es "montar" la señal modulada en la señal de alimentación. Esto se puede comprobar porque no se provoca una variación de frecuencia, amplitud o fase de la señal de alimentación para transportar el mensaje, sino

que podemos observar que sobre la señal de alimentación se encuentra otra señal de mucho menor amplitud que es la señal modulada y cuya portadora tiene una frecuencia más alta (en la frecuencia de modulación que es del orden de cientos de kHz.). A continuación se mencionan algunas ventajas de utilizar la línea de corriente como canal de transmisión de un módem:

- 1) La primer gran ventaja de utilizar la línea de AC como canal de transmisión es que no hay necesidad de tender un cableado especial para el módem, puesto que ya existe el cableado de la instalación eléctrica de la construcción y es todavía mayor ventaja que del mismo cable se tome la energía necesaria para hacer funcionar al módem.
- 2) Este sistema de comunicación no necesita más instalación que el conectar cada aparato a una toma de corriente, lo que simplifica mucho su utilización.
- 3) Aprovechamos la línea de alimentación para dos funciones en lugar de una:
 1. proveer de energía al módem
 2. ser la línea de transmisión
- 4) Podemos instalar el módem muy rápido y en cualquier parte, no hay restricción de instalación para el módem en la casa u oficina, sólo se debe de tener un contacto cerca.
- 5) Se pueden integrar al sistema tantos módems como se desee.

Reconocemos, por otra parte, que utilizar la línea de AC como canal de transmisión puede presentar algunas desventajas, como sucede con cualquier otro tipo de canal de transmisión.

Las desventajas que encontramos son las siguientes:

- 1) La línea doméstica de AC es víctima de señales de ruido de motores, máquinas y ondas de radio todo el tiempo, por lo tanto la interferencia puede ser un factor de desventaja que se tiene que corregir al filtrar exacta y totalmente la señal del mensaje que nos interesa para lograr la mejor recepción posible.
- 2) La interferencia de la señal por factores de ruido externos al módem puede ocurrir aunque se tenga un excelente filtrado.
- 3) Otra desventaja es que se debe tener una buena etapa de acoplamiento y aislamiento para evitar cualquier descarga de 127 VCA hacia el circuito electrónico del módem. Un pico muy grande de voltaje proveniente de la línea puede llegar a dañar el aparato.
- 4) Si la señal encuentra un transformador entre el módem transmisor y el módem receptor, se pierde la continuidad del primario al secundario del transformador, es decir, que la instalación eléctrica del transmisor y receptor estén en diferentes circuitos eléctricos.
- 5) La distancia de la línea puede afectar ya que implica una impedancia, entre mayor sea la distancia del cable entre el transmisor y el receptor, mayor impedancia se podrá medir entre uno y otro. Aunque la longitud del cable no debe ocasionar problemas en una instalación doméstica, éste es un factor que se debe tomar en cuenta para posibles atenuaciones de la señal.
- 6) Si se sufre una pérdida de energía, el módem no podrá funcionar. El uso de un "no-break" de respaldo no es aplicable al módem, si bien puede seguir teniendo su alimentación, la continuidad del circuito se pierde debido al transformador que tienen los "no-breaks" y nunca se podrá transmitir ni

recibir la señal de otro módem.

- 7) Si se utiliza otro módem de las mismas características y con las mismas señales dentro del mismo circuito eléctrico, se transmitirán y recibirán las señales tanto en uno como en otro lo que podrá ser una desventaja desde el punto de vista de la privacidad.

Estas ventajas y desventajas son factores reales que influyen en el funcionamiento de un módem. Como en todo aparato, se pueden encontrar desventajas pero en este caso particular son más importantes las ventajas desde el punto de vista práctico que las desventajas. El simple hecho de ahorrarse una instalación de cableado en una casa para poder tener un intercomunicador es muy atractivo y el ahorro de una instalación de red para computadoras en una oficina también es importante. No hay que olvidar que este es un prototipo que pretende demostrar la posibilidad de comunicarse a través de la línea de corriente alterna de una instalación eléctrica doméstica por lo que aún podrá tener limitaciones en comparación a otros módems comerciales que integran una tecnología preparada para manejar transmisión de datos a mucho mayor velocidad y con elementos de filtrado con muy alta selectividad.

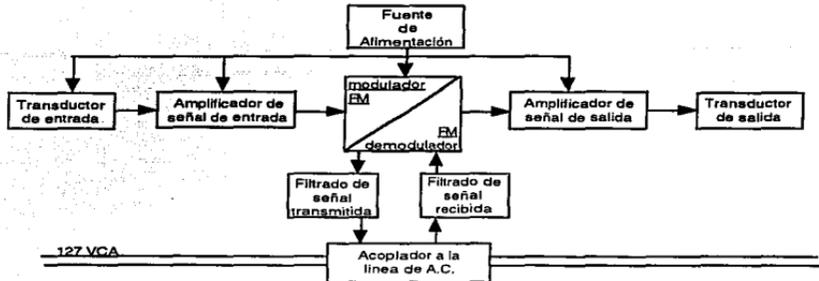
II.c) Etapas que componen a un módem por inducción en la línea de alimentación doméstica

En esta sección explicaremos en forma muy general, las etapas que componen al módem. La explicación detallada de las etapas y del funcionamiento del módem se encuentran en el capítulo III ("Principios de operación del módem por inducción en la línea de alimentación doméstica").

Escogimos la modulación en frecuencia por la robustez de la señal resultante, ya que se puede mantener con menos pérdidas a lo largo del canal de transmisión, y porque la frecuencia de la señal modulada también es mucho mayor a la frecuencia de la señal de 127 Volts de la línea doméstica de AC.

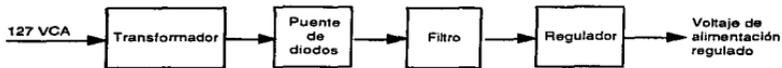
Las etapas principales que componen a un módem como éste son:

- 1.- Fuente de alimentación de energía
- 2.- Transductor de entrada
- 3.- Amplificador de señal de entrada
- 4.- Modulador de FM
- 5.- Filtrado de señal transmitida
- 6.- Acoplador a la línea de AC
- 7.- Filtrado de señal recibida
- 8.- Demodulador de FM
- 9.- Amplificador de señal de salida
- 10.- Transductor de salida

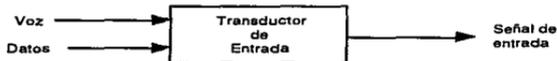


1.- Fuente de alimentación de energía. La fuente de alimentación de energía es la etapa que se encarga de suministrar a todas las demás etapas del módem la energía necesaria para realizar sus funciones. En esta etapa se reduce, rectifica y regula la señal eléctrica de 127 VCA proveniente de la línea de alimentación doméstica para dejarla a un voltaje necesario y hacer funcionar el módem.

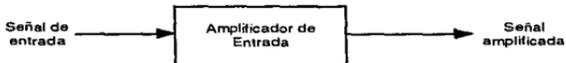
Esta etapa comienza con la clavija y el cable que se conectan a la toma de corriente de 127 Volts y que conducen la corriente hasta el transformador reductor del módem. Ahí se reduce el voltaje de 127 y posteriormente un puente de diodos rectifica la señal de alterna a directa, dos capacitores constituyen el filtro y la etapa termina con dos reguladores de voltaje que fijan el voltaje de alimentación, como se verá posteriormente.



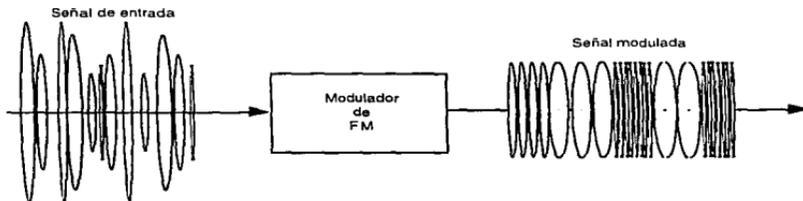
2.- Transductor de entrada. El transductor de entrada es la primera etapa que tiene contacto con "el mensaje" al cual también llamamos "señal original", lo podemos identificar fácilmente porque uno de sus elementos, en el caso del transductor de voz, es el micrófono. Es la etapa en la cual se transforma el sonido como la voz (o los datos) en señales eléctricas con las características necesarias para ser procesada y transmitida. El mensaje se convierte en señal de entrada o señal de banda base.



3.- Amplificador de señal de entrada. Aquí se amplifica la señal de entrada proveniente del transductor de entrada para poder ser modulada y transmitida. La señal de entrada es una señal débil o de bajo voltaje y en el transcurso de su recorrido por las demás etapas del módem se atenúa, por lo cual hay que otorgarle una ganancia mayor a la que trae saliendo del transductor de entrada. En el módem existen varios amplificadores y los vamos a nombrar según el lugar en donde se encuentren o según la función que desempeñen en el manejo de las señales.

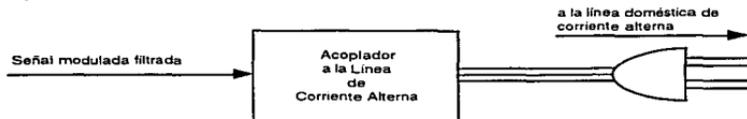


4.- Modulador de FM. El modulador de Frecuencia Modulada es el centro del módem ya que transforma las señales para poder ser transmitidas a través del canal de transmisión. Al generar una señal modulada estamos transformando una señal eléctrica como la señal de entrada, sin características particulares, en una señal eléctrica de alta frecuencia con características bien conocidas para poder rescatarla del canal de transmisión posteriormente en la recepción. En el modulador se modifica la frecuencia de una señal portadora en forma proporcional a la variación que tenga la señal de banda base para obtener la señal modulada en frecuencia o señal de FM.



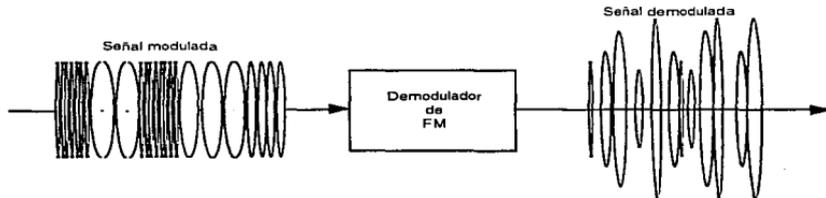
5.- Filtrado de señal transmitida. Después de pasar por el modulador, la señal modulada debe ser filtrada antes de ser enviada al canal de transmisión por el transformador de acoplamiento. El objetivo de este filtro es impedir el paso de señales no deseadas a la línea de corriente alterna y de asegurar la transmisión de la señal en frecuencia que nosotros estamos utilizando en nuestro módem. Posteriormente, se induce la señal modulada y filtrada en la línea de corriente alterna en la etapa de acoplamiento.

6.- Acoplador a la línea de AC. El acoplamiento del módem con la línea de AC es uno de los pasos delicados entre las etapas del módem. Existen diferentes métodos y elementos de acoplamiento para sistemas que lo necesitan, pero todos buscan mantener la continuidad en la comunicación (transmisión o recepción del mensaje) y la discontinuidad de la corriente eléctrica. En esta etapa se acopla el circuito del módem a la línea de corriente alterna, se permite el paso de la señal del módem al canal de transmisión, pero eléctricamente no existe continuidad del circuito del módem al canal de transmisión. En la recepción, el efecto del acoplador es el mismo que en la transmisión, pero el camino que toma la señal es diferente. A partir de este punto se verán las etapas que permiten que el módem pueda también recibir señales y convertirlas en mensajes.



7.- Filtrado de señal recibida. Para recibir una señal, primero hay que reconocerla de cualquier otra señal que se encuentre en el canal de transmisión, para esto utilizamos la etapa de filtrado de la señal recibida que discrimina o selecciona la señal en frecuencia que se quiere recibir. Esta selección se hace con la ayuda de un circuito tanque sintonizado a la frecuencia de la señal que se busca, con algunos elementos que ayudan a filtrar y amplificar la señal recibida para poder ser demodulada posteriormente. El filtrado en su conjunto es un filtrado paso-banda que selecciona la señal modulada en FM que se quiere recibir y evita el paso a cualquier señal parásita o de ruido que altere la información.

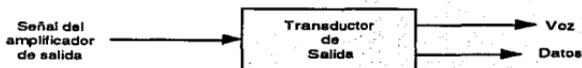
8.- Demodulador de FM. En el demodulador se recupera la señal de banda base original. Después de ser filtrada y amplificada, la señal modulada entra al demodulador de FM y sale de él lista para ser de nuevo amplificada y convertida en el mensaje. El demodulador es la etapa inversa al modulador y las dos labores las realiza en el módem el mismo circuito integrado como se explicará posteriormente.



9.- Amplificador de señal de salida. El amplificador de señal de salida es la etapa previa a la transformación de la señal eléctrica en mensaje original. La señal demodulada sale del demodulador de FM con un voltaje muy pobre (una señal débil) para realizar la transducción final, por lo que se le otorga una ganancia y se deja con un nivel de voltaje adecuado para poder ser reprocesada adecuadamente.



10.- Transductor de salida. En el transductor de salida convertimos, finalmente, la señal eléctrica (señal demodulada y amplificada) en su forma original. Es la última etapa en la cual la señal de salida pasa de señal eléctrica a mensaje, que para el módem puede ser el sonido de la voz o los datos de computadora.



III) Principio de Operación del Módem por Inducción en la Línea de Alimentación Doméstica

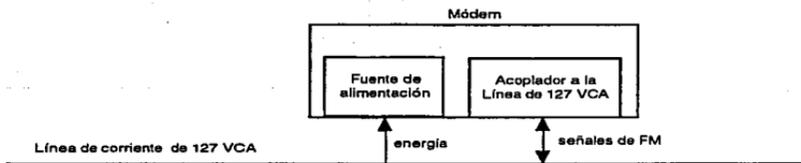
En este capítulo explicaremos el principio de operación de un módem que trabaja por inducción en la línea de alimentación doméstica. Como se ha mencionado, un módem como éste tiene la característica particular de utilizar la línea de corriente alterna de cualquier red eléctrica doméstica como canal de transmisión.

El módem por inducción en la línea de corriente se basa en el principio de la inducción de una señal en un transformador. Cuando el flujo de una bobina penetra a través de otra bobina, se puede inducir una fuerza electromotriz (fem) en cada una por el efecto de la otra. La bobina que contiene la fuente de potencia o la señal a transmitir se llama bobina primaria. La otra bobina en la cual se induce la fem por el cambio de corriente de la primera se llama bobina secundaria. La fem secundaria inducida es proporcional a la rapidez de cambio de la corriente primaria, así que si tenemos en el primario de un transformador de acoplamiento con dos devanados (o embobinados) una señal, en el secundario se inducirá una señal proporcional a la primera sin importar que los dos conductores estén aislados.

El módem por inducción en la línea de corriente opera como un sistema de comunicación con señales de FM a través de un canal sólido como es un cable o un alambre. Este canal sólido lo identificamos como la línea de servicio eléctrico de la casa, todos los cables instalados dentro de la construcción que transportan corriente eléctrica alrededor de la casa para alimentar luces y energizar contactos o enchufes. Otra parte principal del módem está en las etapas de modulación y demodulación que forman parte de los también llamados "acondicionadores" que incluyen las etapas de amplificación, filtrado y acoplamiento a la línea de transmisión.

Se utiliza la línea doméstica de corriente alterna como canal para transmitir la señal y como fuente de alimentación de energía al mismo tiempo. El módem está conectado físicamente a la línea de 127 VCA por medio de dos etapas simultáneamente, una es la entrada a la fuente de poder interna del módem y la otra es la etapa de acoplamiento. Por la entrada de la fuente solamente se procesa la señal de 127 VCA a 60 Hz de la línea para reducirla, rectificarla y regularla de manera que el módem tenga la alimentación que necesita. Por la etapa de acoplamiento, se transmite y recibe la señal de frecuencia modulada que contiene al mensaje.

El siguiente diagrama unifilar muestra las dos etapas que están físicamente conectadas a la línea de corriente de 127 VCA y que distinguen el modo de operación del módem. Aquí se puede interpretar que existen dos conexiones del módem a la línea, pero en realidad es una sola conexión que se hace a través de un cable y una clavija, la separación hacia las dos etapas es interna.

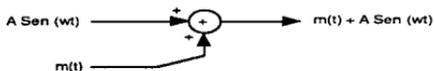


La pregunta más interesante de hacer con este principio de operación es el cómo viaja la señal modulada a través de la línea si ya se tiene una señal de mucho mayor voltaje, y la respuesta está en el hecho de que la señal de FM que se induce a la línea de corriente "se monta" en la señal senoidal de 127 VCA y así viaja por toda la instalación eléctrica. El que una señal se monte en otra significa que una señal, la más grande, será la referencia de la otra en el canal de transmisión.

Decir que la señal modulada se monta en la señal de corriente significa que la señal modulada (como la nuestra que es de 4 V a 200 kHz, por ejemplo) se suma con la señal de corriente de 127 V a 60 Hz. Así que la señal modulada no viaja libremente por el canal de transmisión, son dos señales juntas y sumadas que viajan por toda la línea. El efecto de suma de las dos señales se realiza en el transformador de acoplamiento. El cambio que sufre la señal de 60 Hz es muy pequeño si comparamos la amplitud que tiene ésta de 127 Volts contra los 3 ó 4 V que puede tener la señal modulada. Es por eso que se distingue poco la señal modulada sobre la señal de corriente cuando vemos a la señal de corriente en un osciloscopio, pero sin embargo ahí se encuentra nuestro mensaje.

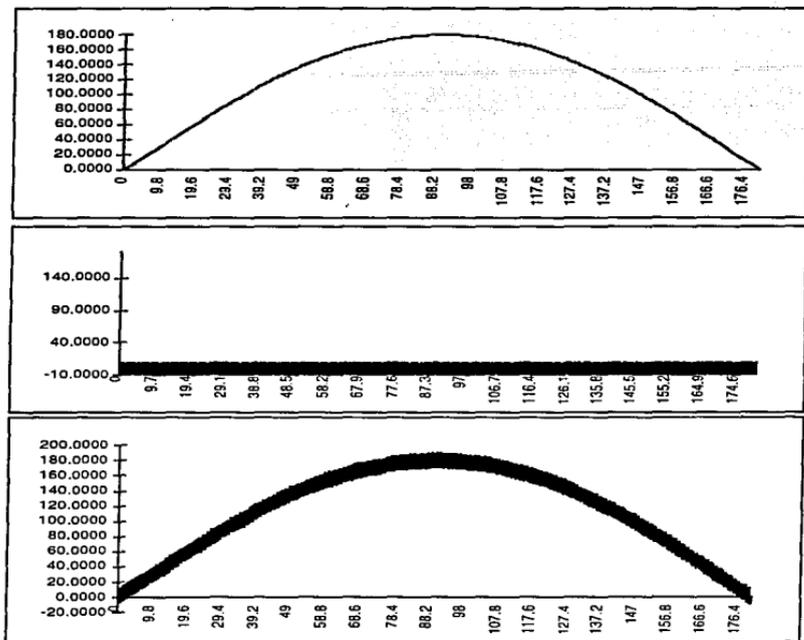
Suma de Señales. Las condiciones básicas para que se realice esta suma son dos, principalmente:

- 1) La frecuencia de la señal modulada es mucho mayor a la frecuencia de la señal de AC: $f_m(t) \gg f_{carrier}$
- 2) La amplitud de la señal de AC es mucho mayor a la amplitud de la señal modulada: $A \gg [m(t)]$



$A \text{ Sen}(\omega t)$: señal de AC
 $m(t)$: señal modulada

En los siguientes tres diagramas se muestra la señal de AC, la señal modulada y la señal suma, respectivamente. Podemos ver cómo dos señales con diferente frecuencia y diferente amplitud son sumadas y dan como resultado una señal que tiene la forma principalmente de la señal de AC, pero que en realidad tiene variaciones de amplitud proporcionalmente con las variaciones de la señal modulada.



Este tipo de suma de señales tiene aplicación en sistemas que transmiten muchas señales por el mismo canal y su eficacia se define cuando podemos extraer eficientemente la señal que nosotros queremos. Este trabajo lo realizan los filtros y circuitos tanque de los receptores. Posteriormente, en el Capítulo VII, explicaremos nuestro proceso de selección, identificación y extracción del mensaje: la recepción.

IV) Características Magnéticas del Núcleo del Transformador Empleado en los Módems

En este capítulo se verán las características magnéticas del núcleo del transformador empleado en el acoplamiento de un módem al canal de transmisión. Las características que nos interesan de un transformador de acoplamiento se centran en la capacidad de transmitir una señal eléctrica de un circuito a otro con la mayor eficiencia, velocidad y precisión posibles. Estos requerimientos tienen que ver en gran medida con el núcleo del transformador, ya que es el responsable de manejar el campo magnético que finalmente provocará la inducción de la señal de un circuito a otro. Por esta razón, ocupamos un capítulo de esta tesis para analizar el núcleo utilizado en un transformador de acoplamiento.

Todos los transformadores están fabricados por devanados que son embobinados de cable conductor alrededor de un núcleo en el que se provoca un flujo magnético como consecuencia de la aplicación de una corriente eléctrica a través del devanado. Generalmente, los transformadores tienen dos devanados independientes y aislados uno del otro, embobinados alrededor de un núcleo de un material con cierta permeabilidad. La **permeabilidad** es la capacidad de un material de conducir un flujo magnético y es una característica de gran importancia en la selección del material del núcleo de un transformador para comunicaciones. El núcleo del transformador tiene una cierta permeabilidad magnética propia debido al material del que está hecho, cuando esta permeabilidad es baja el núcleo opone más resistencia al paso del flujo magnético, pero si la permeabilidad es alta, el núcleo prácticamente no opone resistencia al flujo magnético.

En el devanado se tiene otro tipo de características que se vuelven propias de los transformadores y que hay que observar, como son: la impedancia del alambre, el calibre del alambre y el número de vueltas del alambre alrededor del núcleo.

Un transformador de dos devanados funciona de la siguiente manera: al aplicar una corriente eléctrica a un devanado (el primario) se genera como consecuencia un flujo magnético en el núcleo, este flujo magnético va a provocar de manera recíproca un flujo eléctrico en el otro devanado (el secundario). A este proceso de provocar una corriente eléctrica en un devanado a partir de otra corriente eléctrica en otro devanado independiente y aislado se le llama **inducción**. Esta inducción puede ser reductora o elevadora, dependiendo del número de vueltas del devanado primario y secundario alrededor del núcleo. La relación de voltajes en las terminales de los devanados contra el número de vueltas de cada está dada por la relación:

$$\frac{V_1}{N_1} = \frac{V_2}{N_2}$$

donde V_1 y V_2 son los voltajes del primario y del secundario, respectivamente y N_1 y N_2 son el número de vueltas del devanado primario y secundario, también respectivamente.

Un módem, como el nuestro necesita ser acoplado a un canal de transmisión y para esto se utilizan comúnmente los transformadores de acoplamiento. Estos transformadores son los llamados "transformadores para comunicaciones" que tienen que ser capaces de inducir del primario al secundario las señales eléctricas que se desee. Los cambios de voltaje a alta velocidad se tienen que hacer fácil y rápidamente en el transformador y el responsable principal de que esto sea posible es precisamente el núcleo del transformador.

El origen atómico del magnetismo es consecuencia del movimiento orbital y el espín de los electrones. Las principales clases de materiales magnéticos son las siguientes:

- materiales diamagnéticos
- materiales paramagnéticos
- materiales ferromagnéticos
- materiales ferrimagnéticos
- materiales antiferrimagnéticos

De estos cinco, los más utilizados en núcleos de transformadores son los ferromagnéticos y los ferrimagnéticos. Los materiales ferromagnéticos tienen los espines alineados paralelamente entre sí. El material se divide en *dominios magnéticos*, teniendo cada dominio magnético una magnetización neta aunque no exista un campo externo. Esta magnetización se llama *magnetización espontánea*. Una muestra masiva o volumétrica no tendrá generalmente magnetización neta porque las magnetizaciones espontáneas existentes en los diversos dominios se cancelarán mutuamente. La aplicación de un pequeño campo magnético será causa de un favorable crecimiento de los dominios de los que resulta una elevada magnetización y alta susceptibilidad magnética relativa (que se define como la magnetización por campo magnético unidad entre la permeabilidad magnética del espacio vacío).

$$X = \frac{I}{H\mu_0}$$

X = susceptibilidad magnética (H/m)

I = corriente eléctrica en la bobina (A)

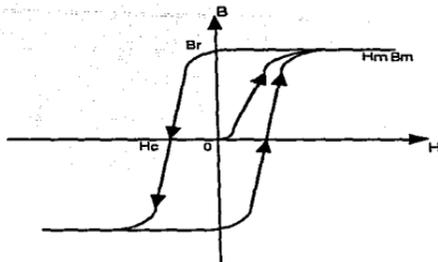
H = campo magnético (A/m), $H = n / l$, donde: n = número de espiras por metro (m^{-1})

μ_0 = permeabilidad magnética en el vacío ($=0.4 \pi \mu H/m$), $\mu = B/H$, donde: B = densidad de flujo magnético (Wb / m^2 ó Tesla)

Por encima de una temperatura crítica, llamada temperatura de Curie, estos materiales se convierten en paramagnéticos y pierden sus propiedades.

Los materiales ferrimagnéticos tienen dos clases de iones magnéticos con espines desiguales orientados en forma antiparalela. La magnetización espontánea puede ser considerada como las dos magnetizaciones iguales y opuestas de los iones en las dos subestructuras. Los materiales ferrimagnéticos se convierten en paramagnéticos por encima de la temperatura de Curie.

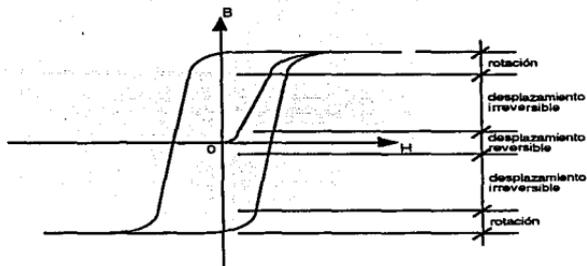
La inducción magnética de estos materiales en función del campo magnético aplicado está representada en la siguiente figura:



Curva de magnetización y ciclo de histéresis de un material ferromagnético

La inducción comienza en 0 en campo cero y alcanza su máximo valor (*máxima inducción*) B_m y el máximo campo H_m en la saturación. La magnetización alcanza un límite superior llamado *inducción de saturación* B_s . Cuando el campo disminuye, la inducción seguirá una curva con valores más altos que los de la curva original. En $H = 0$ permanece una inducción B_r llamada *inducción residual o remanencia*. La máxima inducción residual (cuando los materiales están completamente magnetizados) es la *retentividad*. Para eliminar la retentividad se aplica un campo magnético negativo y la inducción es completamente suprimida en H_c , la *fuerza coercitiva*, o su máximo, la *coercitividad*. El proceso de supresión de la inducción residual se denomina ordinariamente *desmagnetización*, y la porción de la curva comprendida entre B_r y H_c se llama *curva de desmagnetización*. La aplicación de campos negativos más altos saturará eventualmente el material. Invertiendo el campo nuevamente se completará la curva $B-H$ y alcanzará nuevamente el campo máximo H_m y la inducción máxima B_m . La curva completa (figura anterior) se llama *ciclo de histéresis*.

Estos materiales se componen de dominios que son espontáneamente magnetizados en una dirección específica. El campo magnético externo desplaza simplemente las paredes o fronteras del dominio y en los campos más altos cambia el sentido de la magnetización en los dominios. La teoría del dominio explica la baja pendiente inicial de la curva de histéresis como un movimiento reversible de la pared, la segunda parte del escalón de la curva como un movimiento irreversible de la pared y la convergencia final hacia la saturación como rotación de magnetización (ver la siguiente figura).



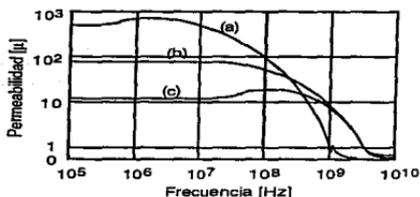
Configuración de dominio ferromagnético en diversas fases de magnetización:

La característica que nos interesa de comportamiento en un transformador para seleccionarlo con fines de comunicación es la histéresis. En los transformadores de acoplamiento son deseables los materiales magnéticos con propiedades especiales como es el ciclo de histéresis cuadrado, la permeabilidad constante o la operación a temperaturas elevadas. El ciclo de histéresis cuadrado nos ayuda mucho porque el cambio de una corriente inducida de positiva a negativa es idealmente instantánea para cierto campo magnético, y cuando manejamos señales de corriente alterna podemos mejorar mucho la eficiencia del transformador.

Como materiales de núcleo se utilizan los ferrimagnéticos no conductores en frecuencias muy altas. Los materiales ferrimagnéticos tienen menor inducción de saturación y muy pequeñas pérdidas de núcleo en virtud de sus resistividades eléctricas elevadas. Las ferritas son generalmente tipos de espinela, magnetoplumbita o granate (ferrita para usos en diferentes frecuencias). La permeabilidad de algunas ferritas comunes a temperatura ambiente está indicada en el siguiente diagrama en función de la frecuencia. Se puede ver que la parte real de la permeabilidad disminuye con el aumento de frecuencia, mientras la parte imaginaria, que está relacionada con las pérdidas, alcanza el máximo y luego disminuye.

Las ferritas se pueden clasificar de acuerdo con su uso en:

- alta permeabilidad, baja frecuencia
- baja pérdida, alta frecuencia
- materiales de microonda
- materiales de ciclo de histéresis escuadrado



Espectro de permeabilidad a la temperatura ambiente de tres ferritas comerciales:
 (a) $\text{Ni}_{.36}\text{Zn}_{.64}\text{Fe}_2\text{O}_4$; (b) $\text{Ni}_{.64}\text{Zn}_{.36}\text{Fe}_2\text{O}_4$; (c) NiFe_2O_4

Entre los tipos de ferritas más utilizados tenemos:

- ferrita Ni - Zn
- ferrita Mn - Zn
- ferrita Ni - Co
- ferrita de ciclo de histéresis escuadrado: Mn - Cu, Li - Ni, Mn - Mg

ferrita	composición	permeabilidad μ	campo mag. H_c [A/m]	magnetización i_s [Wb/m ²]
Ni - Zn	30 Ni - 70 Zn	1050	-	0.4
Mn - Zn	50 Mn - 50 Zn	2000	8	0.25
Mn - Cu	60 Mn - 40 Cu	-	80	0.29
Mn - Mg	50 Mn - 50 Mg	-	0.5	0.27

Los más importantes para nosotros son los del segundo tipo ya que, aparte de sus características, funcionan de manera óptima en el rango de frecuencias de 1 kHz a 1.5 MHz, en el que entra un transformador de acoplamiento del tipo que requiere un módem que utiliza a la línea de corriente de AC como canal de transmisión.

En el Apéndice A se encuentran los cálculos de diseño del transformador de acoplamiento y se define también el tipo de núcleo que se utilizó. Se debe hacer referencia a esta sección para mayor información sobre el procedimiento de diseño.

V) Requerimientos para Transmisión de Voz

Para poder realizar la transmisión de voz debemos tomar en cuenta todos los factores que puedan intervenir e interferir en la comunicación entre dos módems. Por esta razón, se plantean a continuación los transductores, acondicionadores, elementos de acoplamiento y de aislamiento que se necesitan para poder llevar a cabo la transmisión de voz correctamente.

V.a) Transductores

Para que la voz pueda ser transmitida, se tiene que realizar un proceso en el que el sonido se convierta en señal eléctrica. Para lograr esto, se pueden utilizar algunos dispositivos conocidos como son los micrófonos. Los micrófonos pueden ser de varios tipos dependiendo de su principio de funcionamiento.

Entre ellos tenemos, por ejemplo:

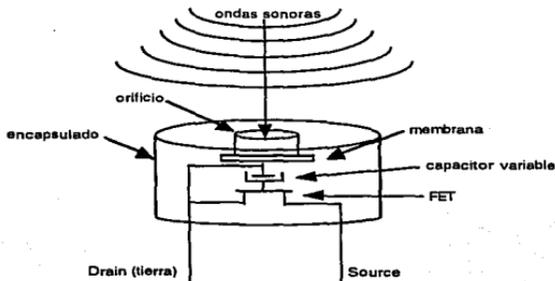
1. **Micrófonos de Carbón:** estos micrófonos consisten en un recipiente con partículas de carbón que son comprimidas por una membrana móvil al recibir el impacto de las ondas sonoras; esta compresión del carbón provoca un cambio en la impedancia y un cambio en cualquier corriente que fluya a través de éste en forma proporcional al sonido.
2. **Micrófonos de Cristal o Piezoeléctricos:** consisten en un pequeño cristal de cuarzo entre dos electrodos que produce variaciones de corriente conforme a las deformaciones que tiene como consecuencia del choque de las ondas sonoras.
3. **Micrófonos de Cinta:** están constituidos por un imán entre cuyos polos pasa una cinta magnética; al llegar el sonido al micrófono, varía la posición de la cinta y por lo tanto, también el campo magnético del imán. Esta variación sirve para crear una corriente que es recogida por una bobina.
4. **Micrófonos de Condensador o Electret:** están compuestos por un condensador o capacitor en el cual una de sus placas es móvil y vibra por causa de las ondas sonoras; al variar la distancia entre las placas, varía la capacitancia y por lo tanto, la corriente que pase por él.

Los cuatro tipos de micrófonos tienen en común que generan cambios de naturaleza eléctrica proporcionales a los cambios de frecuencia de los sonidos que reciben del medio ambiente. La selección de uno o de otro depende de los rangos de frecuencia de sonido que se van a manejar, de la impedancia que se necesite, del tipo de variaciones eléctricas que se quiere tener como resultado, del precio que se pueda pagar, del tamaño que se requiera y del gusto del diseñador.

Para la transmisión de voz, nuestro módem cuenta con un transductor del último tipo: un micrófono electret; por lo que se explicará su estructura y su funcionamiento un poco más a fondo.

El electret es un micrófono que funciona bajo el principio de la variación de corriente. Está formado por una cápsula en la cual se encuentra un capacitor, o condensador, variable cuya parte móvil está expuesta

al medio ambiente por un orificio en un extremo de la cápsula. El capacitor variable cambia la cantidad de corriente que atraviesa a un transistor FET (Field Effect Transistor), que también se encuentra dentro de la cápsula y lo hace en forma proporcional a las variaciones que tenga por el choque de las ondas sonoras en la membrana expuesta.



Estructura interna de un micrófono electret

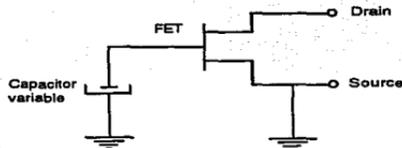


Diagrama de funcionamiento de un micrófono electret

El FET permite una baja impedancia de salida y cierta ganancia según la resistencia conectada entre *drain* (drenador) y la fuente de alimentación. Estas cápsulas electret presentan la ventaja de poder controlar su sensibilidad exteriormente mediante la resistencia de *drain* y poder ser conectada al circuito de amplificación únicamente con dos hilos. Su inconveniente es no poder acceder al *source* (surtidor) y en consecuencia no puede pensarse en la estabilización del circuito de polarización mediante la resistencia de *source*.

El tamaño del componente, su alta sensibilidad, su fácil manejo y su eficiente funcionamiento lo hacen altamente efectivo para aplicarse en un módem como el nuestro.

V.b) Acondicionadores

Ya que tenemos la señal eléctrica es necesario hacerle algunas modificaciones para poder ser transmitida. Estas modificaciones contemplan su amplificación, filtrado y modulación:

1.- La amplificación de la señal es una necesidad constante en el manejo de señales debido a las pérdidas a la que está sujeta la misma en su camino por todo el circuito. Existen muchos amplificadores de audio que cumplen con los requerimientos para el acondicionamiento de la señal de banda base para llegar a la etapa de acoplamiento y la única condición que deben de cumplir es que consigan el aumento de la señal lo suficiente sin distorsionarla.

2.- El filtrado es otra necesidad constante en el circuito debido al ruido al que está expuesta la señal. El ruido se genera por diversas causas y ataca a la señal todo el tiempo, para esto es muy importante contar con los filtros que eviten el paso del ruido y que limpien la señal que nos interesa.

3.- La modulación está propuesta en el esquema de frecuencia modulada (FM). La modulación puede hacerse en amplitud, en frecuencia y en fase, y la razón por la que se escogió la modulación en frecuencia para la transmisión es que la señal en FM es más robusta y se mantiene con menos pérdidas a lo largo del canal de transmisión además de la posibilidad de utilizar una frecuencia mucho mayor a la que tiene la señal de la línea doméstica de AC: la línea trabaja a 60 Hz y nuestra señal a 200,000 Hz. La modulación tiene que centrarse en una frecuencia deseada (que para nuestro módem es de los 200 kHz), por eso decimos que modulamos a 200 kHz. En nuestro módem utilizamos amplificadores de audio hechos con transistores NPN BC548 y con inversores como se verá posteriormente. Los filtros son filtros RLC y RC, y el modulador lo constituye un decodificador de tono 567.

Hay dos consideraciones importantes: una, como ya dijimos, es la señal que debemos de tener en el primario del transformador de acoplamiento para poder inducir la señal al secundario que es el canal de transmisión; y otra, es la señal que debemos tener a la entrada del modulador para que el proceso de modulación y la señal de salida del modulador (o señal modulada) sea la adecuada. Para que el modulador trabaje bien se necesita una señal de entrada del orden de cientos de milivolts y hasta un Volt, hay que tomar en cuenta que un transductor como el electret entrega una señal de decenas de milivolts por lo que hay que amplificarla lo suficiente para que pueda soportar las atenuaciones debidas a las etapas de filtrado y aún así pueda llegar con cientos de milivolts al modulador de FM.

Después del modulador sigue el acoplamiento. A la etapa de acoplamiento tiene que llegar una señal lo suficientemente amplia para que la inducción de la señal al canal de transmisión sea buena. La señal de salida del modulador debe ser del orden de cientos de milivolts y probablemente hasta de 1 ó 1.5 Volts, por lo que hay que amplificar esta señal y filtrarla antes de llegar a la etapa de acoplamiento.

Otra consideración importante en los acondicionadores es evitar las componentes de directa. Para fines de transmisión, debemos de buscar una señal de FM lo más limpia que se pueda, esto es, tener una señal senoidal lo más pura posible sin componentes de directa para que entre libre al canal de transmisión.

V.c) Elementos de Acoplamiento y Aislamiento

Finalmente, tenemos que acoplar el módem a la línea de transmisión. El problema básico se encuentra en el hecho de que tenemos un circuito electrónico que funciona a un voltaje de corriente directa de ± 12 Volts y que lo tenemos que conectar a un circuito eléctrico por donde circula una señal de 127 VCA, que es nuestra línea de transmisión. Es entonces necesario aislar el módem de la línea de corriente, por lo que contamos con transformadores y optoacopladores que permitirán el paso de la señal de comunicación, nuestra señal modulada, pero que aislarán eléctricamente a los dos circuitos: el eléctrico y el electrónico.

Estos elementos pueden servir para el mismo fin, pero sus principios de funcionamiento son diferentes:

1. El **optoacoplador** es un dispositivo que contiene un diodo emisor de luz (LED) infrarrojo y un fototransistor; cuando el LED emite luz, el fototransistor se satura, y cuando el LED se apaga, el transistor se pone en corte. De esta forma el transistor cambiará de corte a saturación cada vez que el LED encienda y de saturación a corte cada vez que el LED se apague. Esta es una manera con la cual podemos transmitir datos de un circuito a otro sin que estén en contacto. Es un elemento muy usado como acoplador para transmisión de datos o de señales digitales porque sus estados son siempre altos o bajos (corte o saturación), pero para la transmisión de señales analógicas tiene sus limitaciones ya que primero necesitaríamos digitalizar las señales analógicas y no podríamos transmitir variaciones de amplitud tan fácilmente como se hace con un transformador.
2. El **transformador** consiste en dos conductores, devanado primario y secundario, aislados uno del otro y embobinados juntos alrededor de un núcleo ferromagnético. Cuando se hace circular una corriente por el devanado primario se genera un flujo magnético en el núcleo que induce una fuerza electromotriz (fem) en el secundario y que puede ser mayor o menor a la del primario dependiendo del tipo de conductor y de la diferencia en número de vueltas de uno y del otro alrededor del núcleo.

Los elementos de acoplamiento constituyen un papel sumamente importante en el funcionamiento de nuestro módem por lo que se pone especial interés en su efectivo resultado en el proceso de transmisión y de recepción. Para este proyecto se decidió utilizar un transformador como acoplador y aislador por su buen desempeño en la transmisión de voz y de datos. Este tipo de acoplamiento recibe el nombre de "acoplamiento inductivo".

Como parte del estudio del funcionamiento del transformador como acoplador se hicieron ciertas justificaciones matemáticas para explicar la forma en que una señal modulada se puede sumar a la señal de corriente alterna de 127 V. A continuación se hace una explicación de este principio.

Acoplamiento Inductivo. Acordaremos llamar primario al lado del transformador donde se encuentra el módem y secundario al lado del transformador que está conectado a la línea de 127 VCA. Cualquier transformador tiene la capacidad y la característica de poder inducir una señal del primario al secundario (y viceversa) gracias a la generación de un campo magnético, producto de la circulación de corriente por el primero.

El acoplamiento inductivo es la técnica más usada para acoplar amplificadores de radiofrecuencia y de frecuencia intermedia (RF, IF). Con el acoplamiento inductivo, el voltaje que se induce en el primario del transformador se transfiere al secundario, y la proporción en la que se transfiere está en función del número de vueltas de los devanados, en la cantidad de flujo magnético en el devanado primario, en el coeficiente de acoplamiento y en la velocidad de cambio del flujo. Matemáticamente, la magnitud del voltaje inducido en el secundario es:

$$E_s = \omega M I_p$$

E_s = magnitud de voltaje inducido en el secundario

ω = velocidad angular ($2\pi f$)

M = inductancia mutua

I_p = corriente del primario

La habilidad de una bobina para inducir un voltaje se llama *inductancia propia* o simplemente *inductancia* (L). Cuando una bobina induce voltaje a otra se dice que las bobinas están acopladas, y la habilidad de una bobina para inducir un voltaje en la otra se llama *inductancia mutua* (M). La inductancia mutua en un transformador es causada por las líneas de flujo magnético que se producen en el devanado primario y que cortan al devanado secundario. De aquí se desprende el *coeficiente de acoplamiento* (k) que es la relación entre el flujo del primario y el flujo del secundario:

$$k = \frac{\Phi_s}{\Phi_p}$$

k = coeficiente de acoplamiento

Φ_s = flujo primario

Φ_p = flujo secundario

Si todas las líneas de flujo del primario cortan al secundario se tendrá un coeficiente de acoplamiento de 1. Esta es una consideración típica que se hace para el análisis de los acopladores inductivos¹.

Para el análisis matemático vamos a suponer dos señales senoidales: una de 127 VCA a 60 Hz en el secundario que corresponde a la línea de transmisión, y otra de 9 VCA a 200 kHz en el primario que corresponde a la señal modulada.

¹ Wayne Tomasi, *Electronic Communications Systems (Fundamental Through Advanced)*, Ed. Prentice-Hall, E.U.A. 1988, Inductive Coupling. Paul H. Young, *Electronic Communication Techniques*, Ed. Merrill, 2da. Edición, E.U.A. 1988, Nonideal Transformer Coupling.

VI) Requerimientos para Transmisión de Datos

Hay ciertos requerimientos para la transmisión de datos que debemos de obedecer para la construcción de nuestro módem. Algunos de estos requerimientos no se aplican exactamente al prototipo de esta tesis, pero existen y es importante mencionarlos y tenerlos en cuenta. La transmisión de datos tiene etapas y mecanismos que puede compartir con la transmisión de voz, por lo que posiblemente se vean similitudes en algunas ocasiones o se compartan abiertamente en otras los principios y las aplicaciones de los subsistemas utilizados para la transmisión de voz. Los datos más conocidos son los datos TTL que son los pulsos generados por la "lógica transistor-transistor". Por esta razón hacemos mención en esta tesis a los datos TTL con los que trabajamos para hacer algunas pruebas de funcionamiento, pero en estricto sentido reconocemos a un dato como un pulso de voltaje sin importar la forma en la que se genere ni el uso que se le dé.

VI.a) Codificación

En toda transmisión de datos debe existir la restricción que se refiere a la codificación. La codificación es la traducción de las señales de datos que se desean transmitir a señales que solamente pueda comprender el receptor. Esto con el fin de mantener un estándar entre transmisor y receptor, y de establecer cierta confidencialidad en el proceso de comunicación de datos.

El proceso de codificación consiste en asociar un "código" a cada mensaje de la fuente; por ejemplo, en una computadora se le puede asociar un conjunto de bits a un carácter, una palabra formada por varios caracteres tiene que ser codificada de igual manera con el conjunto de bits que corresponden a cada carácter pero juntos. Un problema común en el proceso de codificación es la separación de las palabras (llamamos palabras a los conjuntos de bits que tengan un significado en conjunto). Para separar una palabra de otra se debe tener una referencia, la cual puede pensarse como el espacio que separa a una palabra escrita de otra en un texto. En el proceso de codificación se pueden utilizar diferentes códigos como separación, por ejemplo, para separar un conjunto de bits de otro podemos asociarle un prefijo a cada palabra que indique que va a comenzar el conjunto de bits de la misma, el cual puede ser un cero lógico. Al ver un cero lógico sabremos que comienza un código de palabra nuevo.

La codificación de señales es similar a la codificación de caracteres en una computadora desde el punto de vista del uso de los bits o códigos formados por ceros y unos lógicos. Una señal con variaciones de amplitud tiene diferentes niveles y nosotros podemos aproximar el comportamiento en amplitud de la señal con pulsos de diferentes niveles. Supongamos que la amplitud de una señal la podemos dividir en 8 niveles diferentes, cada nivel va a tener asociada una palabra codificada en una serie de bits que represente la amplitud:

Nivel	Palabra Codificada	Nivel	Palabra Codificada
0	000	4	100
1	001	5	101
2	010	6	110
3	011	7	111

Fuente: Donald G. Fink, *Electronics Engineers' Handbook*, Ed. McGraw-Hill, 3ª Edición, pag.4-41

Los pasos a seguir para codificar una señal continua son los siguientes:

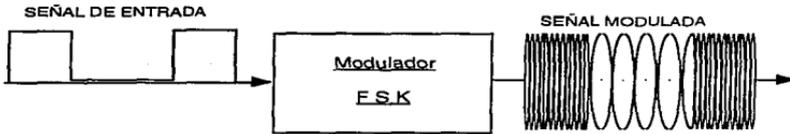
- 1.- Tiene que ser muestreada.
- 2.- Los niveles de pulsos muestreados se codifican en trenes de pulsos (o bits).
- 3.- El tren de pulsos se transmite directamente o se pasa por algún proceso de modulación.

En nuestro caso, la adecuación que realiza el módem se reduce a la modulación en frecuencia de los datos, nuestro fin no es el manejo de datos sino su transmisión. Se puede hacer una codificación previa al módem que consistiría en traducir los datos dentro de la computadora de un formato a otro de manera que sólo otra computadora que pudiera retraducir esos datos comprendiera el mensaje, pero eso queda fuera de nuestro trabajo.

VI.b) Modulación Digital

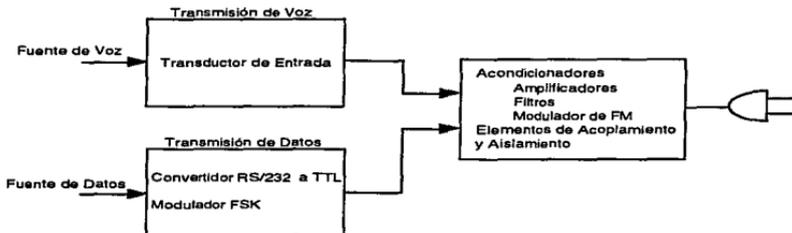
A partir del desarrollo y evolución de las computadoras en los años 50's, se ha creado una "revolución digital" que sigue y seguirá su camino junto con las teorías del muestreo de datos. Estas teorías buscan llevar del mundo analógico al mundo digital todas las señales que se deseen. Actualmente la mayoría de los fundamentos de los sistemas de comunicación de datos digitales son bien conocidos, se forman ya de manera natural tanto las conexiones entre las señales continuas y las discretas, como las conversiones de datos muestreados y su contraparte en tiempo continuo.

La modulación digital tiene como objetivo llevar un proceso de modulación analógica al plano digital. En esta tesis no practicamos la modulación digital porque nos es más conveniente trabajar con señales analógicas, y lo que haremos es modular los pulsos o datos que recibimos de una fuente externa en una señal senoidal con dos frecuencias: una frecuencia alta que identifique un 1 lógico y una frecuencia más pequeña que identifique al 0 lógico. A esta modulación le llamamos **modulación por cambio de frecuencia** (Frequency Shift Keying), mejor conocida como modulación FSK. El efecto que produce lo podemos ilustrar de la siguiente manera:



La señal ya modulada en FSK es una señal que podemos considerar igual a la señal de entrada del proceso de transmisión de voz (visto en el capítulo anterior). Es una señal senoidal con variaciones de frecuencia dentro del rango de frecuencias de la voz humana (entre 300 y 3,000 Hz) y con un voltaje similar al de la señal de entrada, pero sin variaciones de amplitud. Gracias a las transformaciones que se le hacen al mensaje de datos, podemos seguir el mismo proceso de transmisión que con la voz: podemos amplificar la señal con el mismo amplificador, utilizar el mismo modulador de FM y transmitir la señal a través de la línea también será el mismo. Algunos acondicionadores serán los mismos y el acoplador a la línea también será el mismo.

El siguiente diagrama muestra las etapas en común de los diferentes tipos de transmisión de nuestro módem.



La transmisión de voz y la transmisión de datos comparten algunos acondicionadores y todos los elementos de acoplamiento y aislamiento, esto nos ayuda a reducir el tamaño y aprovechar al máximo las funciones de varias etapas. La transmisión de datos es diferente a la de voz en aspectos como los siguientes:

- 1) Los datos provienen de una fuente muy diferente (como una computadora, por ejemplo).
- 2) Usamos un transductor diferente al de la voz.
- 3) Necesitamos un modulador FSK para transmitir los datos.

A pesar de que tenemos elementos diferentes, el proceso general de transmisión es el mismo. Podríamos decir que la diferencia principal radica en el transductor de entrada para la transmisión de voz y datos.

VI.c) Acondicionadores

En la transmisión de datos, como se vio anteriormente, tenemos algunos acondicionadores diferentes aparte de los acondicionadores que se necesitan en la transmisión de voz. Estos acondicionadores son:

- 1.- **Modulador FSK.** Cambia la señal TTL a una señal senoidal con dos frecuencias: 1.5 kHz para el cero lógico y 3 kHz para el 1 lógico.
- 2.- **Demodulador FSK.** Cambia la señal de dos frecuencias a una señal TTL que pueda ser transformada en el formato que las máquinas necesitan.

Al modulador FSK lo podemos ver como el "transductor de entrada" para las señales digitales si queremos comparar los acondicionadores de la transmisión de voz y de datos, y al demodulador como el "transductor de salida" de la recepción de datos. En capítulos posteriores se explicará con más detalle el funcionamiento de estos elementos.

VI.d) Elementos de acoplamiento y aislamiento

De la misma forma que en la transmisión de voz, en la transmisión de datos existen requerimientos para los elementos de acoplamiento y aislamiento: hay que aislar el módem de la línea de corriente con transformadores u optoacopladores que permitan el paso de la señal de comunicación, nuestra señal modulada, pero que aislen eléctricamente a los dos circuitos.

Dichos elementos ya fueron explicados anteriormente. La teoría es exactamente igual ya que el módem maneja las señales de voz y datos en la misma forma a partir de que comparten las etapas.

En el módem utilizamos dos transformadores con funciones totalmente diferentes: uno se ocupa de la alimentación del módem y es un transformador reductor de 127/24 VCA a 500 mA con tab central en el secundario, y el otro realiza la función de sumar la señal modulada (señal que contiene al mensaje) a la señal de 127 VCA 60 Hz, cuando se trata de una transmisión, y de recuperar la misma señal cuando se trata de una recepción. Este último transformador es el de acoplamiento con un tab central en el secundario y una inductancia variable a través de un núcleo móvil.

VII) Diseño de las Etapas para Transmitir / Recibir Voz

En los próximos dos capítulos se hará una descripción detallada de cada uno de los sistemas de transmisión y recepción de voz y datos con los componentes que los integran y con una explicación de su funcionamiento. Por razones lógicas, se procuró aprovechar al máximo cada etapa y para diferentes objetivos se utilizan los mismos elementos y configuraciones, así que las etapas que se repiten para los procesos de transmisión/recepción de voz y de transmisión/recepción de datos serán explicadas la primera vez que sea necesario y posteriormente se hará mención de ellas cuando su configuración y funcionamiento sea igual al ya explicado.

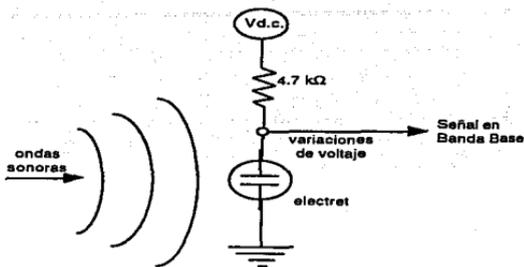
VII.1) Etapas Transductoras (Entrada y Salida)

a) Transductor de Entrada

El transductor de voz de entrada de nuestro módem es un micrófono electret. Como se explicó con anterioridad, el electret recibe las ondas sonoras que provocan la vibración de una membrana interna que a la vez provoca cambios de capacitancia en un capacitor variable que se encuentra en la compuerta (gate) de un FET y termina por cambiar las vibraciones de la membrana por variaciones de corriente en el transistor.

El electret utilizado es un electret de dos terminales, una corresponde a la tierra y la otra corresponde al drenaje (drain) del FET. En esta terminal es en donde vamos a obtener las variaciones de corriente, y con una resistencia entre la alimentación y el electret obtendremos variaciones de voltaje.

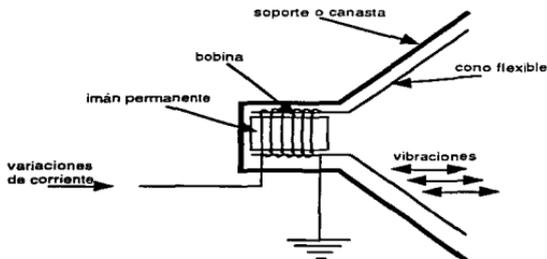
Para su diseño, como se muestra en el diagrama, tenemos una resistencia de 4.7 k Ω conectada a la alimentación y posteriormente tenemos al electret conectado a tierra. Las variaciones de voltaje proporcionales a las variaciones de las ondas sonoras las obtenemos en el punto intermedio entre la resistencia y el electret. Este electret nos sirve para un rango de frecuencias desde 30 a 16,000 Hz, con una baja impedancia de salida. Su voltaje de operación normal es de 1.5V y su consumo de corriente es de 0.3 mA en condiciones normales. La señal eléctrica que nos entrega como resultado de la transducción es una señal de aproximadamente 50 mV en promedio. Esta amplitud no es suficiente para nosotros, ya que al manipularla, modularla y filtrarla sufrirá atenuaciones que debemos de prever. Por este motivo recurrimos a las etapas de amplificación.



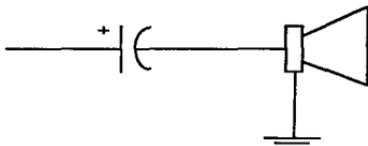
b) Transductor de Salida

El transductor de salida de voz de nuestro módem lo constituye una bocina de $2'' \ 8 \ \Omega$. La bocina es de cono de cartón y tiene un principio de funcionamiento igual al de cualquier otra: el cono flexible y la bobina están adheridas de tal forma que al circular una corriente (o variaciones de corriente) a través de la bobina, teniendo como centro un imán permanente, se producen fuerzas en el sentido del eje del imán de diferentes magnitudes. Estas fuerzas provocan el desplazamiento del cono en mayor o menor grado de acuerdo a la intensidad de éstas, y la variación de las vibraciones del cono provocan variaciones de sonido.

Una bocina como la que escogimos maneja un rango de frecuencias de 450 a 4,500 Hz., lo cual nos permite recibir señales de voz dentro del rango normal de transmisión de la misma (300 a 3,000 Hz.). La configuración de una bocina consta de cuatro partes principalmente como se muestra en el siguiente esquema:



El diseño de esta etapa se logró con la bocina y un capacitor. La función del capacitor es la de acoplar la bocina al circuito evitando el paso de corriente directa. La etapa queda formada así:



La ventaja de utilizar una bocina de cartón es que maneja los rangos de frecuencia necesarios y resulta más económica que una de otro material plástico como el maylar. En esta aplicación no nos preocupa la humedad ya que se supone que el aparato no estará expuesto a ésta. La impedancia de la bocina se requirió de 8Ω para el mejor ajuste y la mejor respuesta.

VII.2) Etapas de Acondicionamiento

Estas son las etapas intermedias entre el transductor de entrada y el acoplador, en el caso de la transmisión, y del acoplador al transductor de salida, en la recepción. Para dar la explicación del diseño y funcionamiento de las etapas de amplificación, modulación y filtrado, se seguirá el orden en el que van interviniendo en el proceso de transmisión y de recepción.

NOTA: Para fines experimentales, se hicieron pruebas de sonido con el circuito transductor de entrada y se promediaron las mediciones de salida de voltaje y de frecuencia. El resultado fue que un nivel de sonido medio con un tono medio-alto genera a la salida del electret una señal promedio de 50 mV y de 1.4 kHz; así que ésta fue la señal de prueba para todo el circuito. Para hacer las mediciones del resto de las etapas, se reemplazó el transductor de entrada por un generador de funciones que entregara una señal de 50 mV a 1.4 kHz. , pero para las explicaciones del funcionamiento de las etapas, se hace mención de la voz o del sonido como los generadores reales de la señal de transmisión.

Para las mediciones de la señal de recepción se hizo exactamente lo mismo: se usó una señal de prueba de 50 mV a 1.4 kHz al módem transmisor y se tomaron las mediciones en el módem receptor, pero para las explicaciones del funcionamiento de las etapas se hace mención, de igual forma, a la voz o al sonido como los generadores reales de la señal de transmisión.

a) Proceso de Transmisión:

Después de haber convertido la voz en señales eléctricas con variaciones de voltaje proporcionales a las variaciones de la voz, tenemos una señal de 50 mV a 1.4 kHz. Esta señal es la que tendrá que ser adecuada para introducirse en el canal de transmisión. Para esto, lo primero que hay que hacer es amplificarla y esto lo logramos con un amplificador:

a.1) Amplificador de Señal Pequeña

Como se describió en los requerimientos para transmisión de voz es necesario amplificar al señal proveniente del transductor de entrada, para lo cual diseñamos un amplificador de señal pequeña emisor común con un transistor NPN 548. Este amplificador es el encargado de amplificar al señal de entrada proveniente del electret para ser filtrada y modulada posteriormente. De acuerdo con el diseño del amplificador que se encuentra en el Apéndice B, a la salida del amplificador tendremos una señal ya amplificada de 1.4 kHz. a 5 V (amplificada 100 veces aproximadamente). Esta señal de banda base es la que enviaremos al modulador de FM.

Antes de llegar la señal al modulador, pasa por la primera etapa de filtrado constituida por un filtro paso-bajas. En el circuito de transmisión tenemos un capacitor intermedio entre la salida del amplificador y el filtro, pero es solamente un capacitor de acoplamiento para quitar la corriente de directa. En esta etapa de filtrado se experimenta una atenuación de la señal lo cual constituye una de las razones por las que es necesario utilizar el amplificador.

a.2) Filtro Paso-Bajas

El filtro paso-bajas nos va a servir para quitar el ruido que se pueda amplificar en la etapa anterior. La impedancia del capacitor y de la resistencia de 20 kΩ provocan una atenuación fuerte de la señal que ahora se puede medir en el rango de los milivolts (aproximadamente, la amplitud de la señal a la salida del filtro es de 25 a 150 mV RMS. Por sus características y valores de componentes, el filtro RC que utilizamos para detener las frecuencias altas con una función de transferencia dada por:

$$H_o = \frac{1/RC^2}{S + \frac{C_1+C_2}{RC_1 C_2}}$$

con una frecuencia de corte de:

$$\omega = (C_1+C_2) / (R C_1 C_2)$$

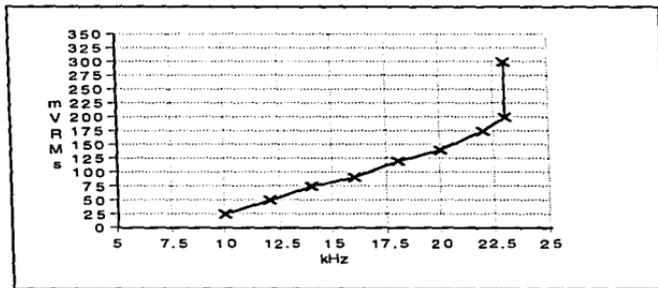
donde su frecuencia de corte se da en $= 5050 = (1\mu + 1n)/(20k \times 1\mu \times 1n)$, suficiente para dejar pasar muy bien las señales de voz pero para detener las altas frecuencias de ruido que se pudieran haber amplificado.

a.3) Modulador de FM

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, la modulación que se eligió fue en frecuencia modulada y el modulador de FM se implementó con el circuito integrado 567 del cual aprovechamos la respuesta del VCO. Este circuito integrado tiene en su interior un VCO que es precisamente quien nos permite hacer la modulación en frecuencia: el VCO (Oscilador Controlado por Voltaje) tiene la característica de variar una frecuencia libre de oscilación que se define exteriormente con un arreglo RC (que en el circuito 567 se encuentra entre las patitas 5 y 6), en función del voltaje de entrada que tenga.

El VCO de nuestro módem tiene una frecuencia libre de oscilación a 200 kHz para que nuestra señal esté sintonizada a esa frecuencia, tal y como se había mencionado anteriormente. Esta es su frecuencia cuando no hay variaciones de voltaje en su entrada y se genera con un capacitor de precisión y una resistencia variable para ajustarla. Con esto decimos que nuestro módem está sintonizado a 200 kHz. Cuando el VCO recibe a la entrada (patita 2) una señal eléctrica proveniente de las primeras etapas del modulador, la frecuencia de salida variará en forma proporcional pero alrededor de la frecuencia libre de oscilación y así obtendremos la señal modulada en frecuencia (FM).

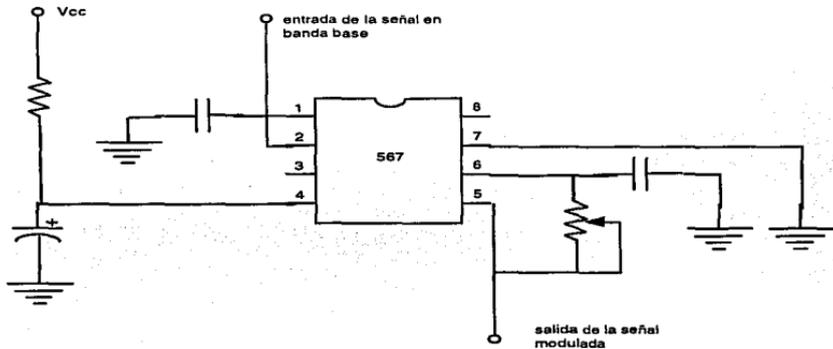
La respuesta del VCO se puede caracterizar en la siguiente gráfica (el eje vertical representa la amplitud de la señal en milivolts RMS y el eje horizontal representa la variación de la frecuencia sobre la frecuencia libre de oscilación):



De acuerdo a la frecuencia libre de oscilación y a la señal de entrada al modulador tendremos una frecuencia de salida oscilando entre los 210 y 220.6 kHz, ya que la amplitud de la señal de entrada al modulador varía entre los 25 y 150 milivolts RMS. Esto lo podemos comprobar en la gráfica anterior que caracteriza el comportamiento del VCO: para 25 mV tenemos una frecuencia de salida de 210 kHz y para una señal de 150 mV tenemos una frecuencia de salida de 220.6 kHz.

Hay 4 razones principales por las que utilizamos el circuito integrado 567 para hacer la modulación y no otros:

- 1) Aunque el circuito es un detector de tono, tenemos un PLL con todos sus componentes.
- 2) Se polariza con una fuente monopolar (el VCO 565 es bipolar).
- 3) Tiene una salida en la pata 8 que es baja cuando se usa como demodulador y alta cuando se usa como modulador: cuando estamos modulando, el amplificador de entrada está polarizado; en cambio cuando se demodula, el amplificador de entrada no está polarizado y no entra ninguna señal moduladora, el transductor de entrada está desconectado prácticamente del circuito.
- 4) A diferencia de otros circuitos integrados PLL, se tiene acceso a la señal de salida del VCO.



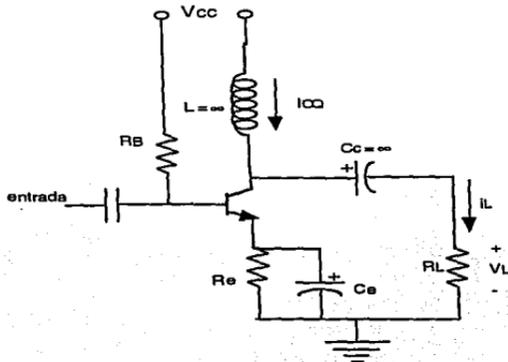
Como otros osciladores, el VCO carga y descarga un capacitor, que en este caso es nuestro capacitor de precisión. Lo que sucede es lo siguiente: cuando el capacitor recibe voltaje, comienza a cargarse, y cuando deja de recibirlo, se descarga con una frecuencia determinada (la frecuencia se fija con los valores de los componentes que acompañan al VCO: resistencia y capacitancia). El capacitor repetirá de nuevo este comportamiento a diferente velocidad, dependiendo de la frecuencia de salida que el VCO generó como consecuencia de la señal de entrada. Estos picos de voltaje son los que nos sirven para la modulación.

Ya que tenemos nuestra señal modulada tenemos que amplificarla finalmente para ser enviada al canal de transmisión. Esta última modificación de la señal la hacemos con el Amplificador Clase A.

a.4) Amplificador Clase A Emisor Común

El amplificador clase A está diseñado para entregar mayor potencia a la salida que un amplificador normal o de señal pequeña, esto es posible gracias a la sustitución de la resistencia de colector por un inductor. La resistencia R_c es la que mayor cantidad de potencia disipa y al cambiarla por un inductor, que generalmente recibe el nombre de *choke*, se puede alcanzar una eficiencia de hasta 50%, el doble que con la resistencia R_c .

El siguiente diagrama muestra un amplificador clase A con su choke. El circuito está diseñado de manera que todos los capacitores sean esencialmente cortos circuitos y el inductor un circuito abierto en corriente alterna (en DC sucede lo contrario), y el inductor se considera idealmente con resistencia interna nula.



$$I_{BQ} = \frac{V - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1)R_e}$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ}$$

El punto de operación se determina por:

$$V_{CC} = V_{CE} + I_{CQ}R_e$$

donde: $V_{CE} = -i_c R_L = -I_L R_L$

$i_c - I_{CQ} = -1/R_L (V_{CE} - V_{CEQ})$

$i_c = 2I_{CQ}$ cuando $V_{CE} = 0$ para máximo swing

$I_{CQ} = V_{CEQ} / R_L$

$I_{CQ} = V_{CC} / (R_L + R_e) = V_{CC} / R_L (1 + R_e / R_L)$

$V_{CEQ} = V_{CC} (R_L / (R_L + R_e)) = V_{CC} (1 - R_e / R_L)$

si $R_L \gg R_e$, entonces:

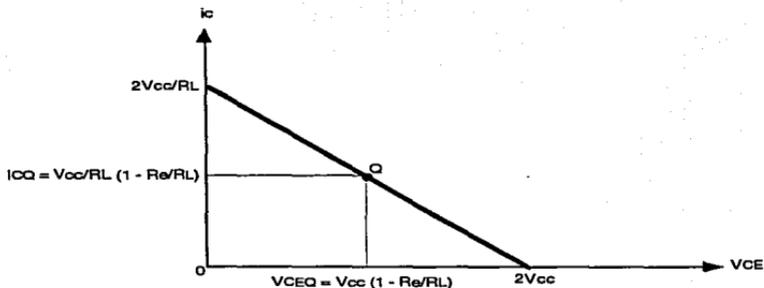
$I_{CQ} = V_{CC} / R_L (1 - R_e / R_L) = V_{CC} / R_L$

$V_{CEQ} = V_{CC} (1 - R_e / R_L)$

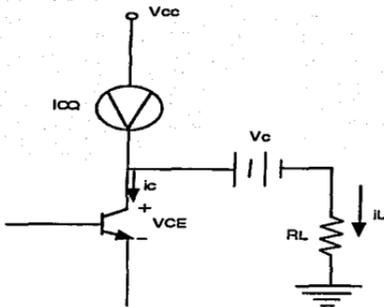
el punto de operación es:

$V_{CEQ} = V_{CC} (1 - R_e / R_L)$

$I_{CQ} = V_{CC} / R_L (1 - R_e / R_L)$



Es importante considerar cómo el voltaje colector-emisor se puede volver el doble que el de alimentación. Si la inductancia se considera alta y, para fines de análisis, se reemplaza por una fuente de corriente I_{CQ} y por la pequeña reactancia capacitiva también se reemplaza el capacitor C_c por una batería de voltaje B_{CC} por ser el voltaje al que se carga cuando no hay señal, vemos que el circuito puede tomar la forma siguiente:



De aquí podemos asumir que en una señal senoidal presente existe un instante en que $i_c = 0$. En este instante $i_L = I_{CQ}$ y $V_{CE} = V_{CC} + i_L R_L$. De las ecuaciones anteriores, podemos ver que $I_{CQ} R_L = i_L R_L = V_{CE}$ de manera que $V_{CE} = 2V_{CC}$. De esta manera se establece el nivel máximo de V_{CE} y cuando la polaridad se revierte, $i_c = I_{CQ}$. Entonces, $i_L = -I_{CQ}$ para que $V_{CE} = 0$ y se establezca el límite inferior.

La eficiencia de este amplificador está dada por:

$$\eta = \frac{P_L}{P_{CC}} = \frac{I_{CQ}^2 (R_L/2)}{V_{CC} I_{CQ}} = \frac{1(I_{CQ})^2}{2(I_{CQ})^2} = 50\%$$

Nota: La explicación detallada de la obtención de la fórmula se encuentra en la bibliografía de pie de página.¹

Cálculos de diseño:

En base a la teoría anterior y a los resultados obtenidos, hacemos los cálculos de diseño que determinarán los valores de los componentes utilizados.

Datos: $P = 4W$ $V_{CEQ} = 12V$ $i_c = 2Amp.$
 $R_L = 10\Omega$ $\beta = 200$

¹ D.L. Schilling & C. Below, Electronic Circuits, Ed. McGraw-Hill, E.U., 1989, pag. 220

$$V_{CEQ} = (P_c \times R_L)^{1/2}$$

$$P_c = \frac{(V_{CEQ})^2}{R_L} = \frac{(12)^2}{10} = 14.4 \text{ W}$$

$$I_{CQ} = (P_c/R_L)^{1/2} = (14.4/10)^{1/2} = 1.2 \text{ A}$$

de aquí obtenemos que la corriente alterna más alta será: $i_c = 1.2 \text{ Sen } \omega t$

$$R_b = 0.1 \times \beta \times R_e$$

$$R_b = 0.1 \times 200 \times 1 = 20 \Omega$$

$$V_{BB} = 0.7 + (1.2 \times 1) = 1.9 \text{ V}$$

$$P_L = \frac{(I_{CQ})^2 R_L}{2} = \frac{(1.2)^2 \times 10}{2} = 7.2 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_L}{P_{CC}} = \frac{(I_{CQ})^2 \times R_L}{2V_{CC}I_{CQ}} = \frac{I_{CQ} \times R_L}{2V_{CC}} = \frac{1.2 \times 10}{2 \times 12} = 0.5 = 50\% \quad \text{eficiencia máxima}$$

Nota: Una figura de mérito en un amplificador clase A es la relación que existe entre la potencia disipada en el colector P_C y la potencia disipada en la carga P_L . En este caso tenemos:

$$\frac{P_C}{P_L} = \frac{14.4}{7.2} = 2$$

y esto es congruente con la eficiencia máxima que se puede obtener de este amplificador.

a.5) Transformador de Acoplamiento

Ya diseñado el amplificador clase A y después de todo este proceso de acondicionamiento, llegamos necesariamente a la etapa de acoplamiento. Esta etapa la constituye el transformador de acoplamiento explicado a detalle en la sección "VII.3 Etapa de Acoplamiento" de este capítulo.

A continuación veremos las etapas que conforman el proceso inverso a la transmisión de voz: la recepción.

b) Proceso de Recepción

El proceso de recepción de voz comienza en donde terminó el proceso de transmisión: en el transformador de acoplamiento.

b.1) Transformador de Acoplamiento

Como se explicará con más detalle en la siguiente sección de este capítulo (VII.3), el transformador de acoplamiento permite recibir las señales provenientes del canal de transmisión enviadas por otro módem. El transformador de acoplamiento permite mandar la señal modulada a través de la línea de transmisión, la línea de corriente alterna, y permite recibirla.

El principio de operación del transformador es el mismo que cualquier otro y constituye una parte esencial en el principio de operación de todo el módem. Como se explicó en el capítulo III, la línea de corriente o canal de transmisión ahora hace circular una corriente alterna a través del secundario del transformador, y las variaciones de voltaje se inducen hacia el primario del transformador. En nuestro módem enviamos la señal transmitida por el tab central del primario del transformador y la señal recibida como variaciones de voltaje en los extremos del primario del transformador.

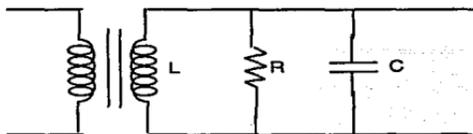
El diseño y las características del acoplador se verán más adelante, lo más importante en este momento es que se identifique al transformador de acoplamiento como la etapa inicial del proceso de recepción. Así como fue la última etapa en la transmisión, es la etapa del módem que hace el primer contacto con la señal modulada en la recepción.

Una parte básica de la recepción es poder seleccionar adecuadamente la señal o señales que nos interesan. En un canal de transmisión, y más si se trata de la línea doméstica de corriente alterna, pueden existir muchas otras señales viajando al mismo tiempo que la nuestra; pero podemos hacer una selección de la señal modulada que nos interesa si conocemos la frecuencia de su portadora. El siguiente paso, entonces, es el de auxiliarnos de un circuito que sintonice a la misma frecuencia que tiene la portadora de la señal modulada a recibir.

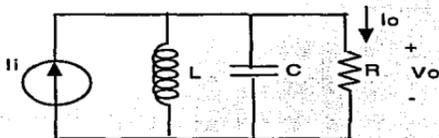
b.2) Circuito Resonante

El circuito resonante es un arreglo RLC que está conformado por el primario del transformador que es el inductor del circuito, por una resistencia y un capacitor en paralelo. Este tipo de circuitos resonantes son muy utilizados en comunicaciones ya que permiten sintonizar la frecuencia de la señal que se desea recibir. Por ejemplo, si nosotros queremos recuperar del canal de transmisión una señal modulada en frecuencia a 200 kHz (como es nuestro caso), podemos diseñar un circuito resonante RLC que tenga una frecuencia de resonancia de 200 kHz que detecte la señal que nosotros queremos y ninguna otra.

El circuito resonante que diseñamos consta del inductor (primario del transformador) de 0.9 mH, de una resistencia de 20 k Ω y de un capacitor de 680 pF. Con estos componentes en paralelo tenemos la resonancia del circuito a una frecuencia de 203,443 Hz, aproximadamente.



Análisis del circuito resonante RLC en paralelo:



$$\begin{aligned} \frac{V_o(s)}{I_o(s)} = Z// (s) &= \frac{1}{Y//(s)} = \frac{1}{1/SL + SC + 1/R} = \\ &= \frac{S/C}{CLS^2 + SL/R + 1} = \frac{1}{S^2 + S/CR + 1/CL} \end{aligned}$$

$$\frac{I_o(s)}{I_i(s)} = \frac{S/RC}{S^2 + S/RC + 1/LC}$$

De la función de transferencia podemos obtener la frecuencia de resonancia y el factor de calidad:

$$\omega_b = \frac{1}{(LC)^{1/2}} = 2\pi f$$

$$\omega_b = \frac{1}{(0.0009 \times 0.00000000068)^{1/2}} = 639137.49$$

$$f = \frac{639137.49}{2\pi} = 203443 \text{ Hz} = 203 \text{ kHz}$$

$$Q = \frac{R}{\omega_b L} = \frac{20000}{(203443 \times 0.0009)} = 109.23$$

El circuito resonante nos ayuda par recibir la señal de FM que queremos, pero la selección no es exclusiva por más selecto que deseemos que sea el circuito resonante. En la inducción de la señal del canal de transmisión hacia el módem por el transformador de acoplamiento se pueden recibir otras señales no deseadas como lo que llamamos "ruido" y la señal que recibimos con la información que buscamos es una señal que tiene características no propias para su traducción: la señal que recibimos puede tener componentes de directa, distorsión y una amplitud de voltaje poco adecuada para un módem que trabaja con señales pequeñas; por eso necesitamos otras etapas que nos adecüen la señal para ser demodulada, que nos filtren la señal demodulada y que nos traduzcan las señales eléctricas en un mensaje que nosotros podamos comprender, ya sea la voz o datos de computadora.

De acuerdo al diseño de la etapa de acoplamiento, el efecto de transformación que genera el transformador no provoca cambios en la señal modulada que vamos a recuperar ya que la relación de transformación es de 1 : 1. El transformador de acoplamiento que se explica en la siguiente sección debe conservar las características de la señal y no modificarlas, por eso el diseño de la etapa de acoplamiento es muy importante y crítica en un módem con este tipo de operación.

Si bien podemos recuperar la señal de la etapa de acoplamiento con la ayuda de este circuito resonante, es necesario adecuarla para ser demodulada. Las siguientes etapas son precisamente las encargadas de adecuar la señal recibida para ser traducida finalmente en el mensaje. La primera que veremos es un limitador.

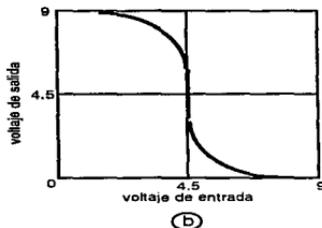
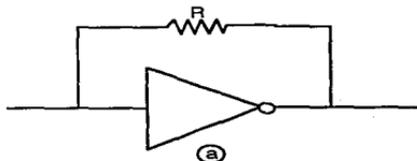
b.3) Limitador

Este arreglo nos sirve para limitar la señal y mantenerla siempre en un mismo nivel de voltaje. Por su configuración, este arreglo de dos diodos en paralelo a tierra junto con sus capacitores impide los picos de voltaje, ya que recorta la señal a un nivel máximo positivo de 0.7V (debido al voltaje del diodo que se encuentra polarizado inversamente) y mínimo de -0.7V (debido al otro diodo).

Los capacitores realizan la función de eliminar la componente de corriente de directa que pueda tener la señal hasta esta etapa; por lo pequeño de los diodos, la impedancia característica que pueden representar para el circuito es considerable. Aunque la frecuencia de la señal es un factor que determina la impedancia de los capacitores, el valor tan pequeño que tienen impide que la impedancia sea despreciable. Por esta razón, tenemos que volver a amplificar la señal modulada recibida antes de ser filtrada y demodulada. La señal proveniente del transformador de acoplamiento tiene un voltaje aproximado de 20V ó 30V, pero tiene que pasar por una resistencia en serie que le reduce por lo menos diez veces su voltaje promedio, ya que hay que recordar que para el resto del circuito del módem tenemos que trabajar con señales pequeñas, y así entra al recortador. Saliendo del recortador tenemos una señal modulada de décimas de Volt y aunque puede ser justo el nivel de voltaje que necesitamos para demodularla, todavía nos falta la etapa de filtrado previa a la demodulación por lo que tenemos que amplificarla un poco. Después de amplificada otro recortador será necesario para evitar los picos de voltaje antes de ser filtrada y demodulada. Para la etapa de amplificación de la señal recibida utilizamos los amplificadores con inversor.

b.4) Amplificador con Inversor

Este tipo de amplificador es muy utilizado en sistemas de audio y video y es el primer tipo de amplificador que tenemos en el proceso de recepción. Consta de un inversor con una resistencia en paralelo como en la figura (a). Esta resistencia es una realimentación negativa para el inversor y le provoca trabajar en la región lineal o central de su comportamiento, en el punto medio y empinado de la gráfica de transferencia de voltaje que se muestra en la figura (b).



El inversor actúa como amplificador Clase A donde se amplifica cualquier señal con voltaje de amplitud intermedia entre los límites máximo y mínimo. Los voltajes cercanos al voltaje de alimentación provocarán el corte de los transistores internos (o unión de materiales P y N como en los transistores) del inversor, y los voltajes cercanos a cero provocarán la saturación, con lo que tendríamos el comportamiento normal de un inversor. Para poder utilizar el inversor como amplificador necesitamos mantenernos en el punto medio, entre corte y saturación, por eso hacemos la realimentación a través de la resistencia. En condiciones de corriente alterna, una entrada positiva provoca una salida negativa y una entrada negativa provoca una positiva.

La ganancia de un amplificador de señal de FM de este tipo con tecnología CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductors*) es de 10 aproximadamente y son muy confiables.

Este amplificador tiene la ventaja de ser económico y de que se pueden tener muchos inversores en un circuito integrado para reducir el espacio. Parte de las razones por las que se usaron estos amplificadores fue por probar su comportamiento y su eficiencia.

Los amplificadores con inversor que utilizamos se construyeron a partir de un circuito integrado 4069 (que tiene 6 inversores) y con resistencias de alimentación de 100 k Ω . Con esta configuración alcanzamos dar a la señal recibida una ganancia de 10 en cada inversor.

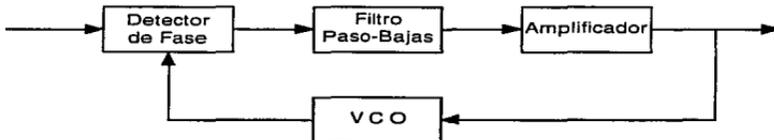
Cabe mencionar que la utilización de estos amplificadores fue por diferentes razones, entre las que se encuentran: su fácil implementación, el aprovechamiento de inversores del integrado 4069 y la prueba de una configuración que resulta muy sencilla.

b.5) Demodulador de FM

La etapa de demodulación la implementamos con el mismo circuito integrado 567 que utilizamos para la modulación. Como ya mencionamos, el 567 es un Decodificador de Tonos que nos permite hacer la demodulación de la señal recibida en FM gracias al PLL que tiene en su interior (detector de fase y VCO realimentados).

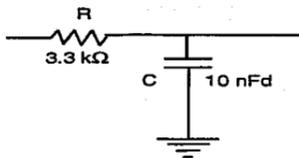
El demodulador trabaja de la siguiente manera: la señal en FM entra al circuito por la patita 3 (input) directamente a un detector de fase I y a otro Q. El detector de fase I nos sirve para dar una salida de voltaje alta o baja (9V ó 0V) en la patita 8: si el detector de fase I detecta la entrada de una señal modulada en FM a la frecuencia establecida, obtendremos en la patita 8 un nivel de voltaje bajo que deshabilitará al transductor de entrada; de otra forma siempre tendremos en la patita 8 un nivel de voltaje alto que permitirá hacer la transmisión en cualquier momento.

El detector de fase Q es el detector de fase que pertenece al PLL. Como en cualquier PLL, la señal de entrada provoca a la salida del detector de fase una corriente directa (o baja frecuencia) proporcional a la diferencia de fase entre la señal de entrada y la señal de salida del VCO. Esta señal pasa entonces por un filtro paso-bajas y por un amplificador (ambos componentes internos del 567) y es introducido a la entrada de control del VCO (ver el siguiente diagrama). Si, por ejemplo, la señal de entrada al PLL aumenta su frecuencia, la diferencia de fase entre ésta y la señal del VCO aumenta también. Esto cambiará el voltaje de control del VCO de tal manera que obligue al VCO a ajustar su frecuencia de nuevo al valor de la frecuencia de la señal de entrada. Así mantenemos siempre la frecuencia del VCO con la frecuencia de la señal de entrada. Este comportamiento es lo que hace al PLL especialmente útil para la demodulación de señales de FM en las cuales la frecuencia de la señal de entrada varía en el tiempo y contiene la información deseada. La señal que finalmente nos interesa es la señal con variaciones de voltaje que sale del detector de fase. Esta señal ya no es una señal de voltaje constante con variaciones en frecuencia (FM), sino una señal de salida con variaciones de voltaje que puede ser traducida en el mensaje original. Esta señal de salida la obtendremos en la patita 2 del 567.



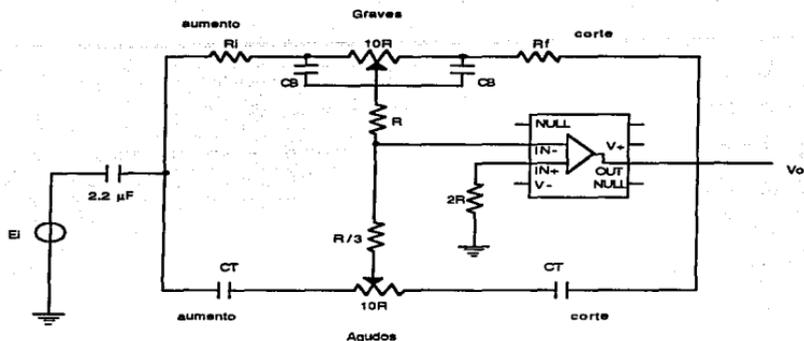
Se utilizó el 567 como demodulador principalmente porque el PLL que tiene integrado está diseñado para demodular frecuencias similares a las que nosotros usamos. Este es un detector de tono para aplicaciones en telefonía y esto nos garantiza que trabajará bien en la transmisión de datos. Aparte, nos es muy útil tener en un mismo circuito integrado al modulador y demodulador de FM.

Cuando la señal sale del demodulador tiene que ser forzosamente filtrada para recuperar la información que sabemos se encuentra en un rango de frecuencias bajo. Primero, quitamos cualquier componente de directa que pueda tener la señal por medio de un capacitor en serie y, posteriormente, usamos un filtro paso-bajas RC con una frecuencia de corte de 4,800 Hz.

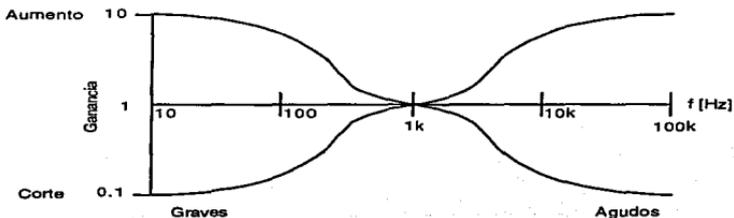


La penúltima etapa del proceso de recepción es la del amplificador de salida. Este amplificador se implementó con un amplificador operacional 386. Después de esta etapa de amplificación solamente queda el transductor de salida que es la bocina de 8Ω que se vio al principio de este capítulo.

En la mayoría de los sistemas de alta fidelidad, el usuario desea tener una característica de control de tono que le permita reforzar o cortar el volumen de las frecuencias bajas o agudas. Un circuito para controlar la frecuencia realizado con resistencias y capacitores puede instalarse en serie con la salida del circuito, pero podría atenuar algunas de las frecuencias. Para evitar esto, existen circuitos de control de tonos que se pueden implementar con amplificadores operacionales. El circuito práctico de control de tonos que se muestra en la siguiente figura refuerza el corte de las frecuencias bajas por debajo de 500 Hz y de las frecuencias agudas por arriba de 2 kHz, y aparte elimina la atenuación.



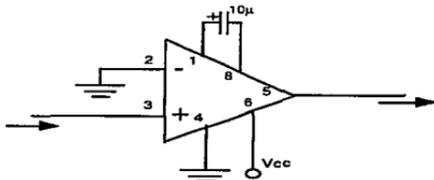
El potenciómetro de audio de $50 k\Omega$ en la parte superior es el control de bajas frecuencias. Al ajustarlo a la posición de refuerzo total, la ganancia de voltaje a 10 Hz es de $10R / R = 10$. Con el potenciómetro en el corte total de bajas frecuencias, la ganancia de voltaje a 10 Hz es de $R / 10R = 0.1$. El potenciómetro de $10 R$ se ajusta para estar en serie con R_i para cortar o R_f para reforzar. Los capacitores reforzadores CB comienzan a puentear el potenciómetro a frecuencias entre 50 Hz y 500 Hz , como se muestra en la siguiente curva de respuesta:



De esta gráfica podemos observar que cuando se ajusta a refuerzo total, el control de agudos R/3 y los capacitores CT establecen la ganancia a 20 kHz de 10. A corte total, la ganancia es de 0.1. Con ambos potenciómetros, los de control de bajos y agudos ajustados al centro de su rotación, la respuesta en frecuencia del circuito de control de tonos será plana. La señal de entrada E_i debe ser más o menos de 0.2 VRMS a 1 kHz. Por tanto, la salida de control de tono estará al rededor del mismo nivel.

b.6) Amplificador de Salida

El último tipo de amplificador que se utilizó en el módem es un amplificador operacional para la salida de la señal recibida hacia el transductor de salida (hacia la bocina). El amplificador operacional es un LM386, amplificador de potencia de bajo voltaje, y la configuración utilizada fue la siguiente:

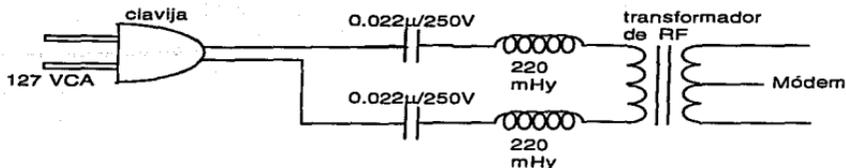


El LM386 es un amplificador de potencia para aplicaciones de sonido diseñado para usarse con bajos voltajes, su ganancia es de 20 hasta 200 y se puede variar con capacitores y resistencias conectados entre las patitas 1 y 8. Es un amplificador de baja distorsión y a nuestro módem le entrega hasta 8 Watts de potencia de salida.

La ganancia de este amplificador es de 50 y está conectado a la bocina (transductor de salida). Un potenciómetro en la entrada funciona como control de volumen, controlando el paso de la señal hacia el amplificador.

VII.3) Etapa de Acoplamiento

La etapa de acoplamiento consta de dos capacitores, dos inductancias y el transformador de acoplamiento. El transformador es el elemento acoplador del módem. Es importante resaltar que el transformador de acoplamiento no es el mismo que el transformador de alimentación: el transformador de alimentación se encarga únicamente de reducir el voltaje de la línea para ser rectificado y regulado como energía para el módem, y el transformador de acoplamiento solamente es el enlace del módem con la línea doméstica de AC. El diseño del transformador de acoplamiento se encuentra en el Apéndice A. A continuación se muestra un diagrama de la etapa de acoplamiento.



Los capacitores de 0.002μF/250V provocan una importante resistencia al paso de la corriente, lo que provoca que la caída de voltaje en este componente sea considerable: de 120 VCA de la línea se pueden tener 25 VCA aproximadamente pasando el capacitor. Esta atenuación es provocada por la reactivancia de los componentes. Los inductores incluidos en el diseño de esta etapa funcionan como filtros de señales de baja frecuencia que pueden provenir de la línea de AC.

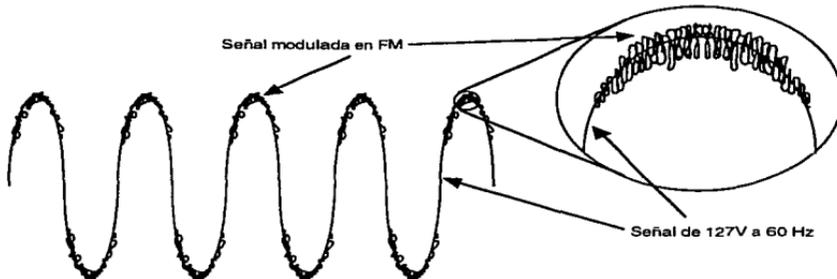
De acuerdo con su diseño, el transformador tiene una relación de transformación de 1:1, su inductancia es variable y de aproximadamente 0.9 mH, su núcleo es de ferrita y tiene un tab central del lado del módem (primario). En la transmisión, llega la señal modulada al primario por el tab central y se induce al secundario como en cualquier transformador. Al inducirse al secundario, donde tenemos una señal de baja frecuencia, lo que se puede asegurar es que la señal modulada se suma a la de voltaje de AC de la línea doméstica. Este efecto provoca que tengamos como resultado en la línea de AC una señal de 120 Volts y 60 Hz con una señal "montada" de 200 kHz.

Un transformador de acoplamiento para sistemas de comunicación tiene la característica de poder transmitir una señal del módem al canal de transmisión sin que estén físicamente conectados. Esto lo logra gracias al fenómeno de la inducción, tal y como se explicó en el capítulo III.

En el proceso de transmisión, la inducción se hace del primario al secundario: en el primario (bobina conectada al módem) tenemos la señal modulada en FM, y gracias al transformador, esta señal se induce al secundario. El núcleo de ferrita del transformador ayuda a que la inducción de altas frecuencias se haga con mucha mayor eficiencia gracias a las características del material y a su capacidad para cambiar rápidamente el sentido del campo magnético que genera la corriente alterna de la señal de FM.

Como se explicó en el capítulo IV, la curva de histéresis del núcleo de ferrita tiene un comportamiento de rápida respuesta para cambios de campo magnético, así que la inducción de la señal transmitida de FM es de alta calidad. La señal inducida al secundario del transformador se suma a la señal existente ya en el canal de transmisión que es la señal de corriente alterna de 127V a 60 Hz. La suma de las dos señales en el secundario nos da como resultado una señal de 127V a 60 Hz con nuestra señal de FM montada sobre ella. Si vemos la señal en el osciloscopio, descubrimos que la forma de la señal de AC de la línea de

corriente con la señal de FM montada se ve así:



Exagerando la imagen del osciloscopio, se ve cómo hay una señal muy pequeña sobre la señal senoidal que es la de la línea de corriente alterna de la red eléctrica doméstica. Es de esta forma como viaja la señal modulada a través de todos los cables de la instalación eléctrica por toda la casa o construcción, y es así como la vamos a recibir en el módem receptor.

En el proceso de recepción, el módem recupera la señal modulada en FM de la señal de AC. En este proceso el transformador induce la señal del secundario, que está conectado al canal de transmisión, al primario, que está conectado al módem, de la misma manera que lo hace en la transmisión pero en sentido inverso. La señal recibida en el secundario tuvo un filtrado previo debido a los componentes que se distinguen en el diagrama. Estos componentes funcionan como un filtro paso banda que detiene las frecuencias bajas con el capacitor y las frecuencias altas con la inductancia.

La recepción de la señal no solo se hace con el transformador, se involucran circuitos resonantes y otros acondicionadores para recuperar la señal y finalmente el mensaje, tal y como vimos anteriormente en este capítulo. El transformador es el elemento más complicado de la etapa de acoplamiento en su diseño y construcción; es el que permite transmitir y recibir las señales de FM. La etapa de acoplamiento es la base del principio de funcionamiento de nuestro módem, ya que después de haber modulado la señal, el transformador es quien nos permite enviarla por el canal de transmisión e igualmente es quien nos permite recibirla.

En el siguiente capítulo se explicará el diseño de las etapas para transmitir y recibir datos.

VIII) Diseño de las Etapas para Transmitir/Recibir Datos

La transmisión y recepción de datos constituye el segundo objetivo de este trabajo. Los datos a los que nos referimos puede ser cualquier señal que generalmente identificamos con pulsos o señales cuadradas con dos estados: alto y bajo. Los datos son comúnmente asociados con información binaria de computadora exclusivamente, pero en esta tesis consideramos a los datos también como el tipo de información que nos puede proporcionar un sensor o detector basados en el simple cambio de estado. Lo que queremos lograr es que a través de la línea doméstica de corriente alterna podamos hacer viajar la información (que indistintamente llamaremos datos) para darle un uso práctico. En este capítulo se verá el diseño de las etapas para transmitir y recibir esos datos utilizando nuestro módem para hacerlos viajar por la línea de corriente de un punto a otro.

Previo al diseño de las etapas, debemos mencionar los tipos de señales o datos que podemos transmitir; por ejemplo: los datos que se obtienen de una computadora por el puerto serie se encuentran en un formato especial llamado RS/232 (las computadoras pueden enviar datos a través de dos tipos de salidas: la serial y la paralela; y para nuestro módem sería necesario utilizar la salida serial por la cual podemos obtener los datos en serie). Otro tipo de datos lo podemos obtener de un circuito que emita un pulso como respuesta a algún estímulo, por ejemplo: un contacto magnético que proporcione un cambio de estado en cuanto se abra o se cierre una ventana, o un sensor de movimiento que dispare una señal en cuanto detecte el movimiento de calor. Tenemos señales y datos de todos tipos: de diferentes voltajes, de diferentes anchos y de diferentes frecuencias, pero para fines experimentales, y buscando un acercamiento al mundo digital, vamos a interpretar los datos como una señal cuadrada a un voltaje aproximado de 5V (para hacer una analogía con las señales de lógica TTL) y una frecuencia variable.

VIII.1) Etapas de Acondicionamiento

La etapa de acondicionamiento, como vimos en el capítulo anterior, es la etapa en la que se prepara y adecúa a la señal que se desea transmitir para que pueda ser manipulada por nuestro módem. En el caso de la transmisión y recepción de datos, vamos a encontrar diferencia en los elementos de acondicionamiento, ya que se trata de señales diferentes a las de la voz pero el objetivo es poder manejarlas de igual manera para aprovechar las etapas ya diseñadas para la transmisión y recepción de voz. Ya definimos el tipo de señal de datos que se utilizó para trabajar en el laboratorio. Es importante mencionar que buscamos una señal semejante a una TTL porque nos amplía las posibilidades de uso del módem a nivel práctico, ya que podemos pensar en transmitir y recibir datos de computador de un punto a otro o de enlazar dos sistemas digitales a través de nuestro módem y de la línea doméstica de corriente alterna, pero en este tipo de aplicaciones será necesario acondicionar el tipo de señal de datos para que sea una señal TTL.

Esto implica, por ejemplo, que en el caso de datos de computadora habrá necesidad de convertir la señal RS/232 (que es el formato normal de señales de computadora) a una señal TTL para poder ser modulada y transmitida, y de TTL a RS/232 para poder ser recibida y comprendida por la computadora receptora.

NOTA: Como éste no es el objeto central de esta tesis, no se abordará el tema completo de los datos y señales de computadora, sin embargo al final del trabajo se anexa información, en el Apéndice C, del formato RS/232 y de dos circuitos integrados que son convertidores RS/232-TTL y TTL-RS/232 para su posible uso práctico.

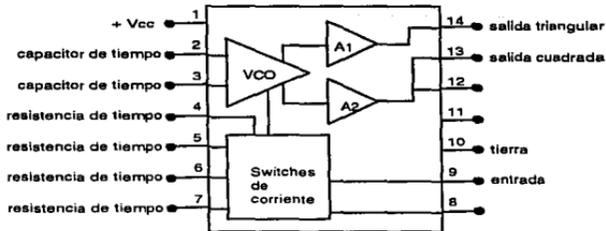
La primera parte de la etapa de acondicionamiento para transmisión y recepción de datos es el modulador FSK. En un capítulo anterior ya se explicó lo que es la modulación FSK y ahora se muestra el diseño del circuito modulador y su funcionamiento.

a) Modulador FSK

El modulador FSK se implementó con un circuito integrado Exar XR-2207. Este circuito integrado es un VCO monolítico con muy buena estabilidad de frecuencia y un amplio rango de sintonía. Entrega a la salida señales triangulares y cuadradas que pueden oscilar en un rango de frecuencia que va de 0.01 Hz a 1 MHz, y es ideal para la modulación FSK.

El XR-2207 utiliza cuatro bloques principales para generar la frecuencia, éstos son: un VCO (oscilador controlado por voltaje), cuatro switches de corriente que son activados por señales binarias, y dos amplificadores para las señales triangulares y cuadradas. El VCO es en realidad un oscilador controlado por corriente que obtiene las variaciones de corriente a la entrada provenientes de los switches de corriente. Como la frecuencia de salida es proporcional a la entrada de corriente, el VCO produce cuatro frecuencias de salida discretas. Dos pines conectados al VCO determinan las corrientes que temporizan al VCO, y estas corrientes son ajustadas por resistencias a tierra de cada una de las terminales de tiempo.

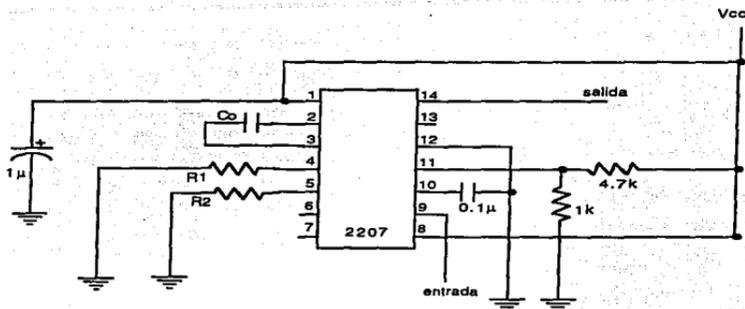
El voltaje de alimentación que requiere el XR-2207 puede ser desde 8V hasta 26V y se ajusta perfectamente a nuestro voltaje de alimentación. A continuación se muestra la estructura interna y el patigrama del XR-2207.



Los principios de operación son los siguientes:

- 1) Capacitor de tiempo (pines 2 y 3): la frecuencia del oscilador es inversamente proporcional al capacitor de tiempo. El capacitor debe ser no polarizado y de un valor entre los 100pF y 100μF.
- 2) Resistencias de tiempo (pines 4,5,6 y 7): estas resistencias determinan la corriente para cargar el capacitor de tiempo y los valores más recomendables son de 2kΩ a 2MΩ.
- 3) Alimentación (pines 1 y 12): la alimentación puede hacerse con un rango de voltaje de ±4V a ±13V con fuente bipolar y de 8V a 26V con fuente monopolar.
- 4) Entrada de señales (pines 8 y 9): la entrada de los datos al circuito integrado tiene una impedancia de entrada de 5kΩ aproximadamente. Los niveles de switcheo se encuentran a <1.4V para el nivel bajo, y >3V para el nivel alto.
- 5) Tierra (pin 10): para una alimentación bipolar debe de estar conectado a la tierra del circuito, para una alimentación monopolar debe estar a la tierra física a través de un capacitor de 1 μF.
- 6) Salidas (pines 13 y 14): la señal FSK de salida puede ser cuadrada (pin 13) o triangular (pin 14). Ambas tienen baja impedancia de salida y están protegidas internamente contra cortos circuitos. La carga recomendada para su óptimo funcionamiento debe ser entre 1kΩ y 100kΩ aproximadamente.

El circuito del modulador FSK con el XR-2207 es el siguiente:



Para su diseño, se tomó como frecuencia alta 3kHz y como frecuencia baja 1.5 kHz, ya que el tope de diferencia de las frecuencias de salida es de $f_H = 2f_L$. El capacitor de tiempo C_o se fijó en $0.05 \mu\text{F}$ para los siguientes cálculos.

Datos: $f_L = 1.5 \text{ kHz}$
 $f_H = 3 \text{ kHz}$
 $C_o = 0.5 \mu\text{F}$

$$f_L = 1/(C_o R_1)$$

$$R_1 = 1/(C_o f_L) = 1/[(0.05 \times 10^{-6})(1.5 \times 10^3)] = 13,333.33 = 13 \text{ k}\Omega$$

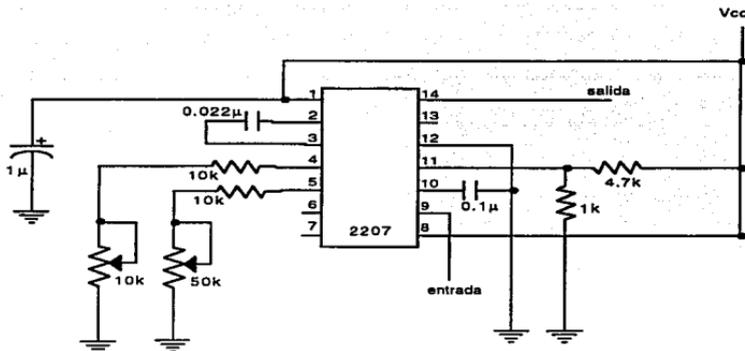
$$f_H = [1/(C_o R_1)] + [1/(R_2)]$$

$$1/R_2 = [f_H - (1/C_o R_1)] \times C_o = [(3 \times 10^3) - \{1/(0.05 \times 10^{-6})(13 \times 10^3)\}] \times (0.05 \times 10^{-6})$$

$$1/R_2 = 0,000073$$

$$R_2 = 13,684.21 = 13 \text{ k}\Omega$$

Con estos valores se implementó el modulador. El siguiente diagrama es el mismo circuito con los valores de sus componentes.



El modulador FSK es una parte del acondicionamiento que es totalmente diferente a la de la voz, pero es comparable al micrófono electret. La contraparte del modulador FSK es el demodulador FSK que va a permitir que la señal demodulada recibida del otro lado regrese a su formato TTL.

VIII.2) Circuitos para Identificación de Usuarios

Esta sección tiene como objetivo abrir la posibilidad de que se tengan en un mismo sistema de comunicación más de dos módems y que varios usuarios hagan uso de él al mismo tiempo. Esta identificación no tiene que ver con el uso que se le dé al módem, no importa si se transmiten datos o se transmite voz, la identificación es la misma.

La identificación de los usuarios en nuestro caso se hace de manera muy sencilla y mecánica. Debemos recordar que la señal de transmisión de nuestro módem que se envía a través de la línea de corriente alterna, es una señal de FM. Cualquier señal de entrada al módem que va a ser transmitida es transformada en una señal de FM en la etapa de modulación con ayuda del circuito 567. La frecuencia a la cual se modula esta señal está definida por el capacitor de precisión y por una resistencia entre la patita 5 y 6. Si nosotros ponemos diferentes resistencias en este punto vamos a obtener diferentes frecuencias de modulación. Esta es la forma en la que fácilmente podemos diferenciar la comunicación entre diferentes usuarios. Lo que hacemos en nuestro módem es que ponemos 4 diferentes resistencias entre la patita 5 y 6 del 567 y conectamos un selector manual, la frecuencia de modulación va a ser

diferente dependiendo de la posición del selector.

Esta es la forma en la que hacemos la identificación de usuarios en nuestro módem. Tenemos 4 diferentes posiciones en el selector de cada módem y para poder establecer una comunicación entre dos usuarios, el transmisor debe tener el selector en la misma posición que el receptor. Podemos diferenciar cada posición del selector con una letra: A, B, C ó D; y podemos tener a 4 usuarios en una misma red eléctrica conectados con su módem. Si el usuario 1 desea comunicarse con el usuario 2 ambos tienen que seleccionar la letra A (o la frecuencia de A, propiamente), si el usuario 3 desea comunicarse con el usuario 4 sin interferir con el usuario 1 y 2, ambos tienen que seleccionar una letra que no sea A, o sea, B, C ó D. Igualmente, si alguno de los usuarios 3 ó 4 desea integrarse a la comunicación de 1 y 2, solamente tiene que seleccionar la letra A y estará en la misma frecuencia que 1 y 2 para transmitir o recibir.

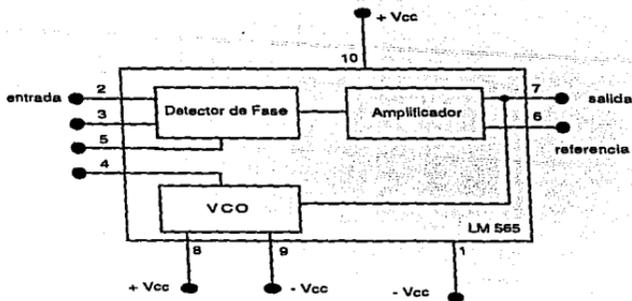
Como vemos, la identificación es mecánica completamente y lo que se recomendaría en este caso es que cada usuario mantuviera siempre seleccionada una letra diferente, de modo que cualquier otro usuario pueda comunicarse con él con solo seleccionar su letra. La ventaja de este sistema de selección e identificación es que resulta muy sencilla para cualquier usuario, y que permite a 4 usuarios diferentes estar siempre listos para recibir algún mensaje; pero tiene la desventaja de no contar con privacidad y si se selecciona una misma letra por varios usuarios todos tendrán acceso a recibir la misma información. Para un sistema de comunicación doméstica como nuestro módem esta desventaja puede no serlo.

VIII.3) Etapa de Demodulación

En el inciso VIII.1 se explicó el circuito modulador FSK, en este inciso se explica el diseño del demodulador que es la contraparte del modulador. Esta etapa tiene como finalidad transformar la señal FSK recibida de la línea de corriente alterna y ya demodulada en frecuencia por el circuito 567, en una señal de datos tipo TTL.

a) Demodulador FSK

El demodulador FSK consiste en un PLL 565 con un amplificador operacional 741. El PLL (Phase Locked Loop) 565 es un filtro y demodulador adaptable a un rango de frecuencias de 0.001 Hz hasta 500KHz. El circuito integrado tiene un VCO de alta estabilidad y linealidad, un comparador de fase, un amplificador y un filtro paso-bajas como se muestra en el diagrama de bloques. La frecuencia central del PLL está determinada por la frecuencia libre de oscilación del VCO. Esta frecuencia puede ser ajustada exteriormente con una resistencia y un capacitor. La alimentación de este circuito es bipolar y puede ser de $\pm 5V$ a $\pm 12V$.



Este demodulador FSK es de muy buena respuesta, pero el voltaje de la señal de salida que entrega es muy bajo, por lo que es necesario contar con un amplificador que le dé la ganancia suficiente para obtener los datos recibidos a un voltaje adecuado y aparte puede funcionar como un circuito comparador para garantizar a la salida una señal cuadrada tipo TTL.

El demodulador FSK es una aplicación típica de este circuito integrado. Para su diseño e implementación se tomaron como datos la frecuencia libre de oscilación que está en función del voltaje de alimentación y de la frecuencia alta de la señal en FSK:

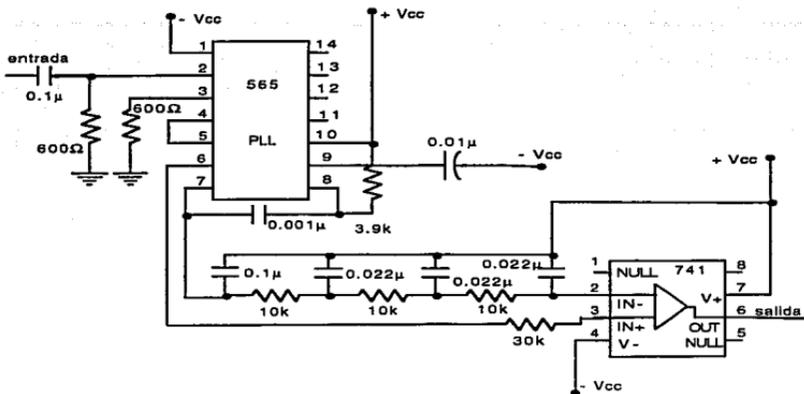
$$f_0 = (f_H V_{cc})/8 = (3,000 \times 12)/8 = 4,500$$

Para el cálculo de la resistencia o del capacitor de tiempo, hay que fijar un valor, ya que uno depende del otro. Para nuestro diseño fijamos el valor del capacitor en $C_0 = 0.02 \mu F$ para obtener el valor de la resistencia de tiempo:

$$R_0 = 0.3/(f_0 C_0) = 0.3/(4,500 \times 0.02 \times 10^{-6}) = 3,333.33 = 3.3 \text{ k}\Omega$$

Con estos cálculos podemos implementar el modulador. La aplicación típica que se encuentra en las hojas de especificaciones de este circuito integrado incluye un comparador como parte del circuito demodulador. Este comparador sirve para hacer los cambios de voltaje.

El siguiente diagrama muestra el circuito demodulador FSK utilizado en el módem junto con el amplificador operacional que sirve de comparador y da ganancia a la señal demodulada.



Conforme se presenta la señal modulada en FSK a la entrada del 555, la frecuencia central de oscilación del PLL se ajusta a la frecuencia de la señal de entrada y comienza a seguirla entre dos frecuencias a las cuales corresponde un diferente nivel de voltaje de corriente directa. De esta manera, el circuito a 565 detecta los cambios de frecuencia de la señal modulada en FSK y los convierte en cambios de voltaje para lograr la demodulación FSK.

El capacitor del filtro de realimentación se escoge pequeño para eliminar el sobredisparo en el pulso de salida. A la salida se tiene un arreglo RC de tres etapas que sirve para eliminar el componente de la portadora de la señal de salida. El ancho de banda de este filtro RC se escogió para que fuera de la mitad de la frecuencia de la señal de datos de prueba (150 Hz) hasta el doble de la frecuencia de la señal de entrada a este circuito (2400 Hz), y así asegurar el libre paso a la señal de buscamos.

Finalmente vamos a necesitar un amplificador operacional que nos dé ganancia y que nos sirva como comparador para que la señal de salida sea perfectamente cuadrada. La comparación de voltaje se hace entre la señal de salida del filtro RC y la patita 6.

La frecuencia libre de oscilación la vamos a ajustar con la resistencia variable conectada entre las patitas 8 y 10. La entrada al circuito a través de un capacitor está diseñada para eliminar la componente de directa de la señal de entrada, ya que no es deseable y no podemos asegurar que la señal de entrada esté exenta de ésta. Ambas entradas al detector de fase se aterrizan con cargas iguales, en este caso están afectadas por resistencias de 600Ω cada una en las patitas 2 y 3.

Este circuito demodulador es el que nos dio mejor resultado y por esta razón se implementó como se describió anteriormente. La demodulación de la señal de datos es muy buena y los resultados de laboratorio son bastante satisfactorios, pero hay que tomar en cuenta que la frecuencia de la señal de datos de prueba es relativamente baja: 300 Hz es una frecuencia que ya no se usa para transmisión de datos de computadora porque la tecnología ha logrado controlar la transmisión de bits a mucho mayor velocidad. Esto es importante recordarlo porque nuestro prototipo de módem es capaz de transmitir y recibir datos pero de "baja velocidad" y esto le quita algunas aplicaciones prácticas a nivel de información de computadora'.

Hay muchas aplicaciones en las cuales podemos aprovechar las características de nuestro módem en la transmisión y recepción de datos. En las conclusiones de la tesis mencionaremos algunas para ejemplificar el posible uso de nuestro módem a nivel práctico.

VIII.4) Etapa de Acoplamiento

De la misma forma en que se tiene una etapa de acoplamiento para la transmisión de voz, también se tiene una etapa de acoplamiento de la señal de salida con la línea de transmisión que es la línea doméstica de corriente alterna. A lo largo de este capítulo se han descrito los circuitos necesarios para la transmisión y recepción de datos basados en un concepto de compatibilidad que nos facilite el diseño. Este concepto de compatibilidad tiene el objetivo de aprovechar al máximo las etapas diseñadas para la transmisión y recepción de voz.

La etapa de acoplamiento es un ejemplo perfecto del aprovechamiento de circuitos que se buscó en el diseño completo del módem. La etapa de acoplamiento para la transmisión y recepción de datos es exactamente la misma que la utilizada en la transmisión y recepción de voz.

El objetivo que se siguió en el diseño de las etapas de transmisión de datos nos llevó a diseñar el o los acondicionadores que permitieran a las señales de datos ser manejadas como señales de voz y gracias a eso ahora podemos hacer referencia a la etapa de acoplamiento del capítulo anterior para la descripción de la etapa de acoplamiento de este capítulo.

¹ Howard M Berlin, Design of PLL Circuits, Ed. Howard W. Sams & Co. Inc., USA

La transmisión y recepción de datos a través de la línea doméstica de corriente alterna puede tener diversas aplicaciones prácticas tanto en una casa como en una oficina o comercio. En este capítulo solamente se abarcó el tema del diseño de las etapas que permiten transmitir y recibir estos datos, pero posteriormente se darán algunos ejemplos de aplicaciones que justifican la utilización de un módem como el de esta tesis en un problema práctico. En el siguiente capítulo se explicará la construcción del prototipo de módem con sus resultados, características y dificultades.

IX) Construcción del Prototipo

En este capítulo se muestra el circuito completo del módem que diseñamos y algunas anotaciones con respecto a la construcción del prototipo que puedan ser relevantes.

Diagrama

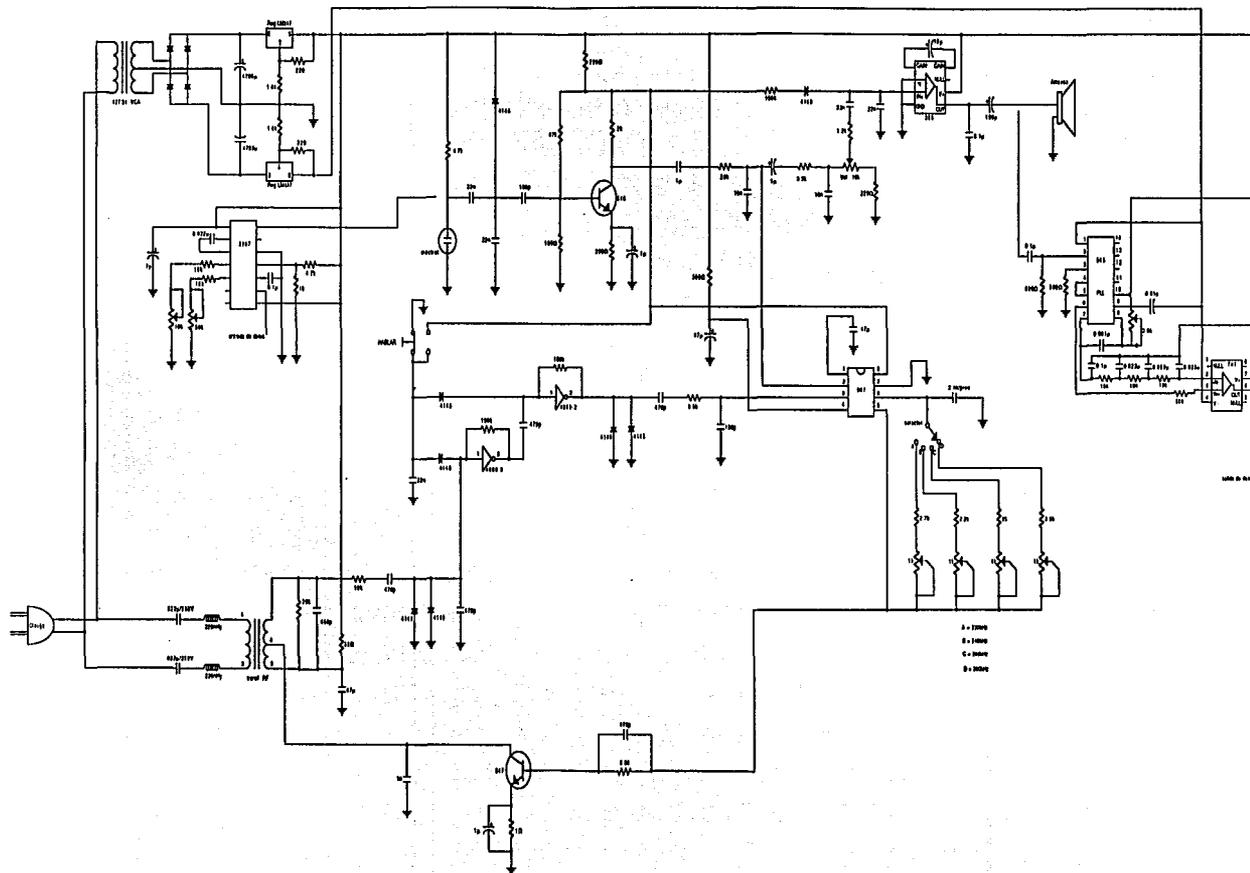
(Ver siguiente página)

Notas

El prototipo del módem se construyó conforme al diseño de las etapas de transmisión de voz y datos que se detallaron en los capítulos VII y VIII. Las partes más delicadas desde el punto de vista de implementación del diseño fueron las correspondientes al modulador y demodulador de FM, al modulador y demodulador FSK, y a la etapa de acoplamiento del módem con la línea doméstica de corriente alterna. El resto de las partes que componen el módem fueron más nobles en el sentido de que necesitaron menos tiempo para que funcionaran como se esperaba. Las mencionadas requirieron de continuos cambios y pruebas para obtener los resultados deseados; por ejemplo, el modulador y demodulador de FM tuvo que contemplar un capacitor de precisión para poder ajustar muy bien la frecuencia de la portadora, el modulador FSK y el demodulador FSK tuvieron que implementarse con distintos tipos de circuitos integrados para obtener un funcionamiento óptimo que permitiera lograr el objetivo, y la etapa de acoplamiento tuvo sus detalles en los valores de los componentes del circuito de amplificación y del circuito tanque o circuito sintonizado, al igual que la selección del transformador de acoplamiento.

Los circuitos relevantes, las observaciones y las conclusiones generales del proyecto se mencionan en el último capítulo. En la siguiente página se muestra el diagrama completo del circuito del prototipo de módem para transmisión y recepción de voz y datos de baja velocidad a través de la línea doméstica de corriente alterna.

PROTOTIPO DE MODEM PARA TRANSMISION Y RECEPCION DE VOZ Y DATOS DE BAJA VELOCIDAD A TRAVES DE LA LINEA DOMESTICA DE C.A.



X) Pruebas y Conclusiones

El "prototipo de módem para transmisión de voz y datos de baja velocidad a través de la línea de corriente alterna" estuvo constantemente sometido a pruebas conforme se fueron diseñando las diferentes etapas que se han descrito a lo largo de esta tesis. Estas pruebas fueron modificando el diseño y obligándonos a buscar nuevas alternativas tanto para obtener los resultados deseados como para experimentar con diversos circuitos.

Pruebas

Los resultados de estas pruebas son los siguientes:

1. Transmisión y recepción de voz.

La transmisión de voz por el módem se calificó como buena ya que cumplió con la función de hacer un enlace de comunicación entre dos módems a través de la línea doméstica de CA sin distorsión ni ruido. Las pruebas se realizaron en el laboratorio y en domicilios con instalaciones eléctricas monofásicas y trifásicas resultando en todos los casos pruebas exitosas.

2. Transmisión y recepción de datos.

La transmisión de datos se realizó en el laboratorio con señales de prueba generadas por un generador de funciones y el resultado también fue exitoso pero con la restricción de mantener una frecuencia de señal de datos muy baja. Como se mencionó en su oportunidad, se utilizó una señal de datos de prueba de 300 Hz con los cuales la transmisión y recepción fue buena pero la posibilidad de utilizar el módem para la transmisión de datos procedentes de una computadora quedó fuera de alcance debido a la frecuencia de transmisión que se requiere en la práctica: actualmente hay módems que transmiten a más de 28,800 bits por segundo (bps). Sin embargo, aún queda abierta la posibilidad de utilizar el módem para transmitir datos o señales ocurientes que indiquen algún suceso o cambio de estado de un mecanismo o sistema.

Conclusiones

De las pruebas realizadas encontramos una característica notoria que no esperábamos: en instalaciones eléctricas trifásicas donde se tienen fases separadas para seccionar la instalación eléctrica de un domicilio se tiene comunicación de un módem a otro aún estando conectados a fases distintas. Este fenómeno no se esperaba y resultó ser una característica positiva. Las instalaciones trifásicas se consideraban como una limitación, pero gracias a este resultado el módem se convirtió en un aparato adecuado para utilizarse en cualquier vivienda u oficina, ya que las instalaciones eléctricas que se utilizan son generalmente monofásicas o trifásicas cuando el consumo de energía es muy alto.

En general, podemos concluir que el diseño del prototipo cumplió los objetivos de funcionamiento hasta un grado experimental como se esperaba. Hay que recordar que nuestro módem es un prototipo de laboratorio que no cuenta con la tecnología más avanzada ni con los circuitos que seguramente poseen los módems comerciales en la transmisión de datos, es una contribución a la comprensión del diseño de un módem que puede transmitir y recibir voz y datos. Cuando vemos al prototipo desde el punto de vista de un transmisor y receptor de datos nos encontramos con sus más limitaciones, como se expuso anteriormente, pero es un prototipo que cumple bastante bien con el resultado esperado. En cambio, el prototipo de módem para transmisión y recepción de voz a través de la línea doméstica de corriente alterna consiguió la intercomunicación entre dos personas de una forma muy satisfactoria, este sistema tiene la gran ventaja de su fácil instalación y operación. Un intercomunicador de este tipo puede ser muy atractivo para uso doméstico o en pequeñas oficinas, siendo una aplicación típica el monitoreo de bebés desde una recámara a otra.

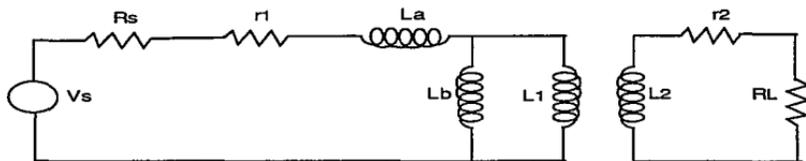
Costeo

La construcción y pruebas del prototipo se realizaron en su totalidad en el laboratorio de Intec de México, S.A., donde se otorgaron todas las facilidades para el desarrollo de esta tesis. En esta compañía dedicada a la intercomunicación se le vio al prototipo una aplicación práctica y una posible oportunidad de comercialización, por lo que se realizó un breve costeo del producto: el costo de componentes electrónicos del prototipo es actualmente de \$ 88,53 . Hace falta tomar en cuenta la inversión que se tiene que hacer para la fabricación de un gabinete apropiado y atractivo para los usuarios que tiene un costo aproximado de \$80,000.00 para la fabricación del molde de inyección de sámac que debe durar unas 20,000 inyecciones. Si el plástico y la inyección del gabinete se pueden estimar en \$6.96 (\$5.84 + \$2.12, respectivamente) y \$1.90 de empaque, entonces podemos calcular que el costo de materia prima con es de \$ 97.39. Si calculamos que un operador que perciba dos veces el salario mínimo puede ensamblar 10 módems diarios ($2 \times \$26.40 = \$52.80 + 10 = \$5.28$), entonces el costo aproximado del módem es de \$102.67. De aquí necesitamos definir el precio del producto que sea atractivo para el público y que le retribuya una utilidad suficiente al distribuidor y al fabricante pensando en que se tiene que amortizar la inversión hecha en el molde de inyección. Un posible precio de venta al público de este producto es de \$340.00 por módem y habría que esperar la aceptación en el mercado.

Para terminar, es necesario agradecer a esta gran compañía su respaldo en cuanto al equipo de medición, herramienta, material necesario, asesoría y apoyo incondicional. Gracias a ella se hizo esta tesis.

Apéndice A: Diseño del Transformador de Acoplamiento

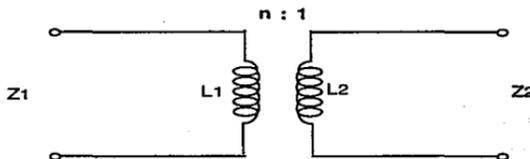
Para desarrollar el diseño del transformador de acoplamiento nos basamos en el procedimiento propuesto por Colonel W.T. Melyman en su libro "Transformer and Inductor Design Handbook" ¹. Comenzamos por plantear el circuito equivalente de un transformador de acoplamiento al que se asocia una carga y una fuente de voltaje:



donde: $r1$ y $r2$ = resistencia del devanado

L_a y L_b = pérdidas magnéticas; en condiciones ideales $L_b \gg L_a$

Para el acoplamiento de impedancias que necesitamos entre la línea de corriente y el módem se determina la impedancia en cada uno con sus características que para nuestro caso son las siguientes:



donde: $f_1 = 60$ Hz

$f_2 = 200$ kHz

$V = 15$ V

$Z_1 = 16 \Omega$

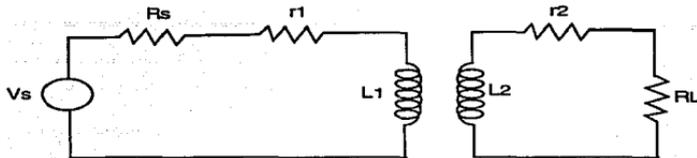
$Z_2 = 1000 \Omega$

n = relación de transferencia

¹ Transformer and Inductor Design Handbook, Colonel W.T. Melyman, Ed. Marcel Dekker Inc., N.Y. United States of America, 1990.

² La impedancia de la línea se justifica con la corriente que debe circular por el devanado secundario y el voltaje medido en el mismo: $7.9 \text{ mV} / 0.485 \text{ mA} = 16.28 \Omega \approx 16 \Omega$

Para los cálculos nos basamos en un model más sencillo que es el siguiente:



donde \$R_s\$ y \$R_L\$ representan las impedancias a acoplar.

Tenemos tambien que definir ciertos parámetros de diseño:

- 1) Para máxima tranferencia de energía : $R_s = n^2 R_L$

$$n^2 = \frac{R_s}{R_L} = \frac{10}{1000} = 0.01$$
- 2) Para una eficiencia $\eta > 80\%$: $r_1 \ll R_s$ y $r_2 \ll R_L$
- 3) Definimos la constante $k = 0.98$

Planteamos a continuación las fórmulas del método de diseño y calculamos los valores resultantes:

$$R_a = R_s + r_1, \text{ pero } r_1 \text{ es despreciable así que: } R_a = R_s = 16$$

$$R_b = n^2 (R_L + r_2), \text{ pero } r_2 \text{ es despreciable así que: } R_b = n^2 R_L = 0.01 (1000) = 10$$

$$L_a = \frac{R_a + R_b}{2\pi (f_1)} = \frac{16 + 10}{2\pi (50)} = 0.068967$$

$$L_b = \frac{R_a R_b}{(R_a + R_b) \times 2\pi \times f_2} = \frac{16 (10)}{(16+10) \times 2\pi \times (200,000)} = 0.000005$$

$$k = \frac{(L_b)^{1/2}}{(L_a - L_b)^{1/2}} = \frac{(0.000005)^{1/2}}{(0.068967 - 0.000005)^{1/2}} = 0.008427$$

$$L_1 = \frac{L_b}{(k)^2} = \frac{0.000005}{(0.008427)^2} = 0.070412$$

$$L_2 = \frac{(k)^2 L_1}{n^2} = \frac{(0.008427)^2 \times 0.070412}{(0.01)} = 0.0005$$

Los siguientes cálculos son para realizar la construcción del transformador:

a) Corriente

$$I = \frac{V}{2\pi \times f_1 \times L_1} = \frac{15}{2\pi \times 60 \times 0.070412} = 0.565085$$

b) Potencia Aparente

$$Pt = V \times I = 15 (0.565085) = 8.476269$$

c) Area Aparente

$$Ap = Aw Ac = \frac{(Pt \times 10,000)^{1.14}}{(4.44 \times Bm \times f_1 \times ka \times kj)^{1.14}} = \frac{(8.476269 \times 10,000)^{1.14}}{(4.44 \times 1.2 \times 60 \times 0.4 \times 534)^{1.14}} = 1.279477$$

donde: $Bm = 1.2$

$ka = 0.4$

$kj = 534$

d) Selección Nucleo

Seleccionamos el núcleo EI 50, que según las tablas 2.4 incluidas al final de este apéndice, tiene las siguientes características:

$$Ap = 1.75$$

$$Ac = 1.45$$

$$D = (Ac)^{1/2} = 1.2$$

e) Número de vueltas

$$N = \frac{V \times 10,000}{4.44 \times Bm \times f_1 \times Ac} = \frac{15 \times 10,000}{4.44 \times 1.2 \times 60 \times 1.45} = 323.59 = 324 \text{ vueltas}$$

f) Entrehierro

$$lg = \frac{0.4 \times \pi \times N^2 \times Ac \times 10^{-8}}{L_1} = \frac{0.4 \times \pi \times (324)^2 \times 1.45 \times 10^{-8}}{0.070412} = 0.027166$$

g) Corrección por dispersión

$$F = 1 + \frac{lg \times \ln(2 \times G/ig)}{(Ac)^{1/2}} = 1 + \frac{0.027166 \times \ln(2 \times 1.2/0.027166)}{(1.45)^{1/2}} = 1.101098$$

h) Corrección del Número de vueltas

$$N1 = \frac{(lg \times 1.1)^{1/2}}{(0.4 \times \pi \times Ac \times F \times 10^{-8})^{1/2}} = \frac{(0.027166 \times 0.070412)^{1/2}}{(0.4 \times \pi \times 1.45 \times 1.101098 \times 10^{-8})^{1/2}} = 308.76 = 309 \text{ vueltas}$$

i) Densidad de corriente

Apéndice A

$$J = k_j \times (A_p)^{-0.12} = 534 \times (1.75)^{-0.12} = 499.317389 \text{ [A/cm}^2\text{]}$$

j) Area de cobre necesaria

$$A_{cv} = \frac{I}{J} = \frac{0.565085}{499.317389} = 0.001132 \text{ [cm}^2\text{]}$$

k) Selección de calibre y características

De la tabla 6-1 que se encuentra al final de este apéndice, buscamos el area de cobre calculada para saber de qué calibre se trata así como sus características:

Tipo de cable:	AWG25
Calibre:	Cat. 25
resistencia:	$R = 1345 \text{ } [\Omega/\text{cm}] = C$
diámetro:	$D = 0.0452 \text{ [cm]}$

Tabla 2-4 Características de Laminación

Tipo de Núcleo	Ag [cm ²]	Ap [cm ⁴]	MLT [cm]	N / AWG	Ω 50°C	P _Σ	I	S	Ω 75°C	P _Σ	I	S	Peso		Volumen [cm ³]	Ac [cm ²]
													le	Cu		
1 EE-3031	4.07	0.0088	1.72	90 30	0.580	0.123	0.323	638	0.645	0.288	0.472	932	1.02	1.02	0.65	0.0502
2 EE-2829	6.53	0.0228	2.33	147 30	1.300	0.199	0.276	546	1.430	0.464	0.403	795	2.19	1.34	1.35	0.0407
3 EE-187	14.20	0.1080	3.20	314 30	3.820	0.432	0.237	469	4.190	1.010	0.347	685	7.09	3.80	4.34	0.2040
4 EE-2425	23.30	0.9300	5.08	498 30	9.610	0.714	0.192	380	10.500	1.670	0.281	555	15.50	9.60	9.22	0.3630
5 EE-2627	38.50	0.9060	5.79	245 25	1.680	1.220	0.602	371	1.850	2.840	0.876	540	45.80	15.50	19.10	0.8160
6 EI-375	46.20	1.2300	6.30	350 25	2.620	1.430	0.522	322	2.870	3.340	0.762	470	49.70	24.70	25.30	0.8160
7 EI-50	53.20	1.7500	7.09	263 25	2.210	1.730	0.625	385	2.430	4.040	0.912	562	90.60	31.70	36.80	1.4500
8 EI-21	62.10	2.3600	7.59	372 25	3.340	1.980	0.544	335	3.660	4.620	0.793	489	99.30	41.00	39.20	1.4500
9 EI-625	83.20	4.2900	8.84	503 25	5.270	2.700	0.505	312	5.790	6.300	0.737	455	179.00	44.40	60.00	2.2700
10 EI-75	120.00	8.8900	10.60	219 20	0.826	3.900	1.540	296	0.906	9.100	2.240	432	312.00	105.00	104.00	2.2700
11 EI-37	163.00	16.5000	12.30	296 20	1.340	5.280	1.400	270	1.480	12.300	2.040	393	481.00	135.00	164.00	4.4500
12 EI-100	213.00	28.1000	14.50	396 20	2.070	6.900	1.290	249	2.270	16.100	1.880	363	412.00	241.00	246.00	5.8100
13 EI-112	270.00	44.9000	16.00	492 20	2.910	8.760	1.230	237	3.190	20.400	1.790	344	1029.00	342.00	350.00	7.3400
14 EI-125	333.00	69.7000	17.70	625 20	4.090	10.800	1.150	222	4.490	25.300	1.680	324	1414.00	460.00	481.00	9.0700
15 EI-138	403.00	107.0000	19.50	740 20	5.330	13.000	1.100	213	5.850	30.200	1.610	310	1880.00	680.00	629.00	11.6000
16 EI-150	473.00	143.0000	21.20	893 20	6.990	15.500	1.050	203	7.670	36.300	1.540	295	2457.00	906.00	829.00	13.1000
17 EI-175	742.00	263.0000	24.70	1050 20	9.850	21.100	1.034	199	10.800	49.300	1.510	291	3906.00	1273.00	1312.00	17.8000
18 EI-36	649.00	324.0000	25.50	1701 20	16.600	23.300	0.836	161	10.300	54.500	1.220	235	3575.00	2355.00	1654.00	19.3000
19 EI-19	1069.00	601.0000	31.70	2866 20	33.800	32.800	0.696	134	37.100	76.500	1.015	196	4889.00	3805.00	2875.00	17.8000

Tabla 6-1 Tabla de Alambres

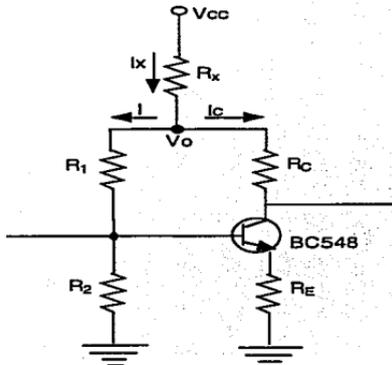
Calibre del Alambre AWG	Área sin Aislamiento [cm ² x10(-3)]	Resistencia [10(-6) Ω/cm] a 20° C	Área con Aislamiento [cm ² x10(-3)]	Diámetro [cm]	Peso [gm/cm]
18	8.2280	209.5	9.3260	0.1040	0.074720
19	6.5310	263.9	7.5390	0.0980	0.059400
20	5.1880	332.3	6.0650	0.0879	0.047260
21	4.1160	418.9	4.8370	0.0785	0.037570
22	3.2430	531.4	3.8570	0.0701	0.029650
23	2.5880	666.0	3.1350	0.0632	0.023720
24	2.0470	842.1	2.5140	0.0566	0.018840
25	1.6230	1062.0	2.0020	0.0505	0.014980
26	1.2800	1345.0	1.6030	0.0452	0.011630
27	1.0210	1687.6	1.3130	0.0409	0.009450
28	0.8046	2142.7	1.0515	0.0366	0.007470
29	0.6470	2664.3	0.8548	0.0330	0.006020
30	0.5067	3402.2	0.6785	0.0294	0.004720

Apéndice B: Análisis del Amplificador de Entrada

En este apéndice se detalla el análisis del amplificador de entrada así como su diseño y el cálculo de su ganancia.

Análisis de señal pequeña.

El amplificador de entrada utilizado es el siguiente:

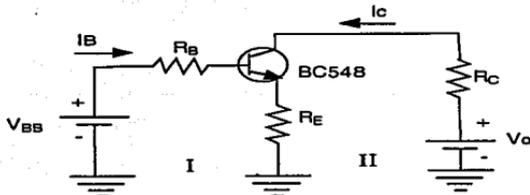


donde tomamos las siguientes consideraciones previas:

$$V_o = V_{CC} - R_L I_c$$

$$I_x = I_c + I_1 \text{ pero } I_c \gg I_1$$

Para su análisis lo convertimos por el método de Thevenin-Norton al siguiente circuito:



donde: $R_B = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ y $V_{B8} = \frac{V_{CC} R_2}{R_1 + R_2}$

Por malla I:

$$V_{B8} - R_B I_B - V_{BE} - R_E I_E = 0 \quad I_E = (\beta + 1) I_B$$

$$V_{B8} - (R_B + R_E (\beta + 1)) I_B - V_{BE} = 0$$

$$\frac{V_{CC} R_2}{R_1 + R_2} - (R_B + R_E (\beta + 1)) I_B - V_{BE} = 0$$

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} (V_{CC} - R_E I_C) - (R_B + R_E (\beta + 1)) I_B - V_{BE} = 0 \quad I_C = I_C$$

$$\frac{V_{CC} R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_2 R_E I_C}{R_1 + R_2} - (R_B + R_E (\beta + 1)) I_B - V_{BE} = 0 \quad I_C = \beta I_B$$

$$V_{CC} R_2 - [(R_2 R_E \beta / R_1 + R_2) - (R_B + R_E (\beta + 1))] I_B - V_{BE} = 0$$

para $I_B = 0$ tenemos:

$$V_{BE0} = \frac{V_{CC} R_2}{R_1 + R_2}$$

para $V_{BE} = 0$ tenemos:

$$I_{B0} = \frac{V_{CC} R_2}{(R_1 + R_2) [(R_2 R_E \beta / R_1 + R_2) - (R_B + R_E (\beta + 1))]}$$

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} R_2 - V_{BE}}{R_1 + R_2 + \frac{R_2 R_E \beta}{R_1 + R_2} + R_B + R_E (\beta + 1)}$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ}$$

Por malla II:

$$V_O - R_C I_C - V_{CE} - R_E I_E = 0$$

$$V_O - (R_C + R_E) I_E - V_{CE} = 0$$

para $I_C = 0$ tenemos:

$$V_{CE0} = V_O$$

para $V_{CE} = 0$ tenemos:

$$I_{C0} = \frac{V_O}{R_C + R_E}$$

$$V_{CEQ} = V_O - (R_C + R_E) I_{CQ}$$

Diseño.

Para el diseño del amplificador se utiliza el método de " $V_E = 0.1 V_{CC}$ "

$$V_E = 0.1 V_{CC}$$

$$I_{CQ} R_E = 0.1 V_{CC}$$

$$R_E = \frac{0.1 V_{CC}}{I_{CQ}}$$

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{CEQ} - R_E I_{CQ}}{I_{CQ}}$$

$$R_B = 0.1 (\beta + 1) R_E$$

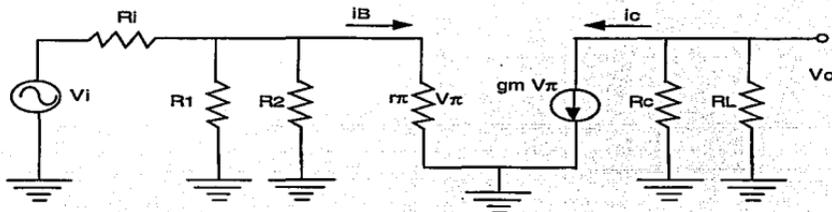
$$V_{BB} = [(R_B / \beta) + R_E] I_{CQ} + V_{BEQ}$$

$$R_1 = \frac{R_B V_{CC}}{V_{BB}}$$

$$R_2 = \frac{R_2 R_B V_{CC}}{V_{CC} - V_{BB}}$$

Análisis en Corriente Alterna.

Para el análisis en corriente alterna nos basamos en el siguiente circuito:



donde:

$$g_m = \frac{I_{CQ}}{n V_T}$$

$$r_\pi = \frac{\beta}{g_m}$$

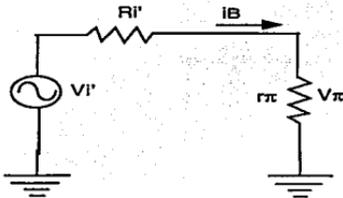
1) Ganancia de voltaje sin carga:

$$AV_{sc} = \frac{V_o}{V_i} = \frac{V_o}{V_{\pi}} \times \frac{V_{\pi}}{V_i}$$

$$V_o = R_c i_c = R_c g_m V_{\pi}$$

$$\frac{V_o}{V_{\pi}} = R_c g_m$$

simplicamos el circuito por Thevenin-Norton:



$$R_i' = \frac{R_B R_i}{R_B + R_i}$$

$$R_B = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

$$V_i' = \frac{V_i R_B}{R_B + R_i}$$

$$V_i' - I_B (R_i' + r_{\pi}) = 0$$

$$I_B = \frac{R_B V_i}{(R_B + R_i) (R_i' + r_{\pi})}$$

$$\frac{V_{\pi}}{r_{\pi}} = \frac{R_B V_i}{(R_B + R_i) (R_i' + r_{\pi})}$$

$$\frac{V_{\pi}}{V_i} = \frac{R_B r_{\pi}}{(R_B + R_i) (R_i' + r_{\pi})}$$

$$AV_{sc} = \frac{R_c g_m R_B r_{\pi}}{(R_B + R_i) (R_i' + r_{\pi})}$$

2) Ganancia de voltaje con carga:

Solamente cambiamos la resistencia de colector por la resistencia de la carga:

$$A_{Vcc} = \frac{R_c \parallel R_L}{(R_B + R_i) (R_i' + r_\pi)}$$

$$R_c = R_L \parallel R_c$$

3) Ganancia de corriente con carga:

$$A_{icc} = i_o = \frac{i_o}{i_b} \times \frac{V_r}{V_r}$$

$$i_o = \frac{R_c i_c}{R_c + R_L} = \frac{R_c \beta i_b V_r}{R_c + R_L}$$

$$\frac{i_o}{V_r} = \frac{R_c \beta}{R_c + R_L}$$

$$i_b = \frac{R_B i_o}{R_B + r_\pi} \quad V_r = r_\pi i_b$$

$$\frac{V_r}{i_b} = \frac{R_B r_\pi}{R_B + r_\pi}$$

$$A_{icc} = \frac{R_c \beta}{R_c + R_L} \times \frac{R_B r_\pi}{R_B + r_\pi}$$

4) Impedancia de entrada y de salida:

$$Z_i = R_B \parallel r_\pi$$

$$Z_o = R_c$$

5) Características del amplificador:

Ganancia de voltaje sin carga:

Ganancia de voltaje con carga:

Ganancia de corriente con carga:

Impedancia de entrada:

Impedancia de salida:

Alta

Media - Alta

Alta

Media

Media

Calculos.

Con los resultados obtenidos anteriormente calculamos los valores de los componentes necesarios y la ganancia esperada.

Datos:	$V_{cc} = 12 \text{ V}$	$I_{CQ} = 6 \text{ mA}$
	$\beta = 200$	$V_{CEQ} = 1.2 \text{ V}$
	$V_T = 26$	$V_{BEQ} = 0.7 \text{ V}$

$$R_E = 0.1 \times \frac{12}{0.006} = 200 \Omega$$

$$R_C = \frac{12 - 1.2 - (200 \times 0.006)}{0.006} = 1600 \Omega$$

$$R_B = 0.1 \times (200+1) \times 200 = 4020 \Omega$$

$$V_{BB} = [(4020/200) + 200] \times 0.006 + 0.7 = 2.02 \text{ V}$$

$$R_1 = \frac{4020 \times 12}{2.02} = 23.88 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = \frac{4020 \times 12}{12 - 2.02} = 4.83 \text{ k}\Omega$$

$$g_m = \frac{0.006}{1 \times 0.026} = 0.23$$

$$\pi = \frac{\beta}{g_m} = \frac{200}{0.23} = 869 \Omega$$

$$R_i = 0.01 \Omega \quad R_i' = \frac{4020 \times 10}{4020 + 10} = 9.97 = 10 \Omega$$

$$A_{Vsc} = \frac{1600 \times 0.23 \times 4020 \times 869}{(4020 + 10)(10 + 869)} = 362.9$$

$$R_L = 1000 \Omega \quad y \quad R_q = \frac{1000 \times 1600}{1000 + 1600} = 615 \Omega$$

$$A_{Vcc} = \frac{615 \times 23 \times 4020 \times 869}{(4020 + 10)(10 + 869)} = 139.5$$

$$A_{icc} = \frac{1600 \times 0.23 \times 4020 \times 869}{(1600 + 1000)(4020 + 869)} = 101.1$$

$$Z_i = \frac{4020 \times 869}{4020 + 869} = 714.5 \Omega$$

$$Z_o = 1600 \Omega$$

Apéndice C

Los datos que se extraen de una computadora por el puerto serie se encuentran en un formato especial llamado RS/232 (las computadoras pueden enviar datos a través de dos tipos de salidas: la serial y la paralela; y para nuestro propósito sería necesario utilizar la salida serial por la cual podemos obtener los datos en serie).

El acondicionamiento de las señales de datos a transmitir, es parecida a la de las señales de voz pero tiene una etapa previa la cual consta de la conexión física de la computadora al módem por medio de un conector DIN-25, como se necesita, y de un convertidor de RS/232 a TTL. Posteriormente la señal de TTL es modulada en FSK y ya así es posible acoplarla al amplificador tipo A de la transmisión de voz. A continuación se explicarán estas subetapas de acondicionamiento necesario que prácticamente sustituyen al transductor de entrada del sistema de transmisión de voz de nuestro módem.

RS/232

Las comunicaciones digitales, además de un medio, requieren de estándares para que el enlace entre dos puntos sea apropiado. Es por ello que se han diseñado estándares de interfase para la conexión entre equipo de terminal de datos (DTE, data terminal equipment) y equipo de comunicación de datos (DCE, data communications equipment). El DTE puede ser una computadora, una impresora, un teclado o cualquier otro sistema digital; El DCE es el módem.

Existen varias organizaciones internacionales y nacionales que se encargan de dictar las normas y estándares empleados: CCITT (Comité Consultivo Internacional de Telefonía y Telegrafía), ISO (Organización Internacional de Estándares), ANSI (Instituto Nacional de Estándares Americanos), EIA (Asociación de Industrias Electrónicas), IEEE (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos) y NCE (Sistema de Comunicaciones Nacionales).

Uno de los estándares adoptados por muchas industrias es la interfase RS/232C, que es una interfase serial también conocida como la interfase estándar de la EIA. Su desarrollo corresponde a la EIA junto con Bell Systems y compañías independientes de computadoras en 1969.

El RS/232C emplea como estándar de transmisión serial un voltaje negativo -Vo para un 1 binario y un voltaje positivo Vo par un 0 binario, donde $3 \leq V_o \leq 25$ con un valor típico de 6V. Este voltaje se mide con respecto a una tierra común. A este tipo de transmisión se le conoce como desbalanceada o de terminación sencilla ya que sólo se usa un cable para la transmisión. Aunque en el estándar no se especifica el tipo de conector a emplear, generalmente se emplea el DB-25. La interfase RS/232C puede transmitir y recibir datos hasta 20 kb/s y manejar longitudes de cable hasta 15 metros (se puede llegar a longitudes mayores con pares trenzados si la capacitancia se mantiene menor a 2500 pF.

A continuación se muestra un conector DB-25 con la descripción de cada pin:

designación de señal	#pin	#pin	designación de señal
secondary transmitted data	14	○	1 protective ground
DCE transmitter signal element timing	15	○	2 transmitted data
secondary received data	16	○	3 received data
receiver signal element timing	17	○	4 requested to send
	18	○	5 clear to send
secondary requested to send	19	○	6 data set ready
data terminal ready	20	○	7 signal ground / common return
signal quality detector	21	○	8 received line signal detector
ring indicator	22	○	9 + voltage
data signal rate selector	23	○	10 - voltage
DTE transmitter signal element timing	24	○	11
	25	○	12 secondary received line signal detector
		○	13 secondary clear to send

En la siguiente tabla se muestran las funciones de cada pin que son de cuatro tipos: tierra, control, datos y reloj.

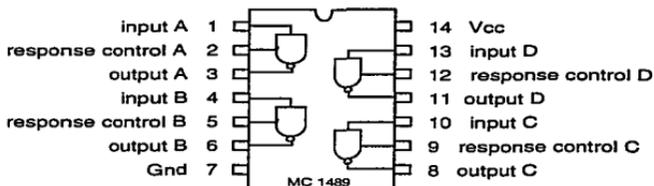
Interfaz RS/232		Tipo de señal y dirección						
DB- 25	RS- 232	Descripción de la función del RS/232	Datos		Control		Reloj	
			de GND	a DCE	de DCE	a DCE	de DCE	a DCE
1	AA	protective ground	X					
7	AB	signal ground / common return	X					
2	BA	transmitted data			X			
3	BB	received data		X				
4	CA	request to send					X	
5	CB	clear to send				X		
6	CC	data set ready				X		
20	CD	data terminal ready					X	
22	CE	ring indicator				X		
8	CF	received line signal detector				X		
21	CS	signal quality detector				X		
23	CH	data signal rate selector (DTE)					X	
23	CI	data signal rate selector (DCE)				X		
24	DA	transmitter signal element timing (DTE)						X
15	DB	transmitter signal element timing (DCE)						X
17	DD	receiver signal element timing (DCE)						X
14	SBA	secondary transmitted data			X			
16	SBB	secondary received data	X					
19	SCA	secondary request to send					X	
13	SCB	secondary clear to send				X		
14	SCF	secondary received line signal detector				X		

Las señales de control sirven para mantener una comunicación constante entre las dos terminales para saber si existieron errores en la transmisión y corregirlos. La información se manda en bloques y cada terminal está obligada a indicar el momento en que se va a mandar, si se recibió o no se recibió, y cómo se recibió. Las señales de reloj son las que indican la velocidad a la que se va a transmitir la información para ser bien recibida, y las señales de datos son las que transportan la información, por ejemplo:

cuando los módem se conectan entre sí el DCE manda un 1 por la línea 22 para indicarle al DTE que comenzará una comunicación, al detectarlo, éste mandará un 1 por la línea 4. Un 1 por la línea 8 indica que el módem está recibiendo información a través del canal. La línea 23 indica el baudaje que se usa de los dos comunes. Y las líneas 15 y 24 indican donde está localizado el reloj, si en DTE o en DCE. Nuestro módem va a realizar la función de recibir la señal digital RS/232 y transmitirla a través de la línea de corriente alterna igual que como lo hacemos con la señal de voz, para esto es necesario que adecúe la señal digital para poder ser manipulada como señal de voz. Al recibir la señal RS/232, el módem tiene que cambiar el formato RS/232 a un formato TTL para poder transformar la señal digital TTL a una señal FSK que puede va a ser nuestra señal de entrada para el resto de la adecuación y transmisión tal y como la hacemos con la señal de entrada de voz.

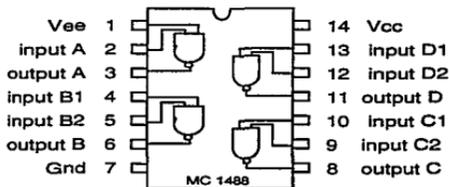
Convertidor RS/232 a TTL

El convertidor RS/232 a TTL se implementó con un circuito integrado 1489 que es un "driver" para aplicaciones de terminales y módem. Es un circuito de 14 patitas con tierra, alimentación y 4 convertidores con su entrada para la señal RS/232 y su salida de señal TTL. A continuación se muestra la estructura interna del 1489.



Convertidor TTL a RS/232

El convertidor TTL a RS/232 se implementó con un circuito integrado 1488 que es muy parecido al 1489 pero funciona inversamente, los 4 convertidores tienen entrada para TTL y salida de RS/232. A continuación se muestra el esquema de este circuito.



Bibliografía

Donald G. Fink & Donald Christiansen

Electronics Engineers Handbook

Ed. McGraw-Hill, 3ª Edición.

Coupling and coupling networks, p. 3-37

Audio transformers, p. 7-15

Normas Técnicas para Instalaciones Eléctricas

Ed. Libros Económicos, México, D.F. 1989.

Resistencia Eléctrica de Conductores de Cobre, p. 277

D. Halliday & R. Resnick

Física Parte 2 (Physics Part Two)

Ed. CECSA, México, D.F. 1990

Ley de inducción de Faraday, p. 225

La inductancia, p. 251

Instalaciones en Edificios

México, D.F., 1984

Distintos sistemas de distribución, p. 413

Wayne Tomasi

Electronic Communications Systems (Fundamental Through Advanced)

Ed. Prentice-Hall, E.U.A. 1988

Inductive coupling, p. 152

Frequency shift keying, p. 490

B.P.Lathi

Sistemas de Comunicación

Ed. Interamericana, México 1986

Donald G. Fink & Donald Christiansen

Manual de Ingeniería Electrónica, Volumen IV:

"Sistemas y aplicaciones electrónicas: telecomunicaciones"

Ed. Mc. Graw-Hill

Donald G. Fink & Donald Christiansen

Manual de Ingeniería Electrónica, Volumen II

Ed. Mc.Grow-Hill, México 1992, p.6-79

Paul H. Young

Electronic Communication Techniques

Ed. Merrill, 2nd. Edition, E.U.A. 1988

Nonideal transformer coupling, p. 25

D.L. Schilling & C.Below

Electronic Circuits

Ed. McGraw-Hill, E.U. 1989, p. 220

Howard M. Berlin

Design of PLL Circuits

Ed. Howard W. Sams & Co. Inc., U.S.A.

Colonel W.T. Melyman

Transformer and Inductor Design Handbook

Ed. Marcel Dekker Inc., N.Y. U.S.A., 1990

Charles E. Sporck, National Semiconductor Corporation

Linear Databook 3

Ed. National Semiconductor, Santa Clara CA, E.U.

Robert F. Coughlin & Frederick F. Driscoll

Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados Lineales

Ed. Prentice Hall, 4ª edición, México 1993.