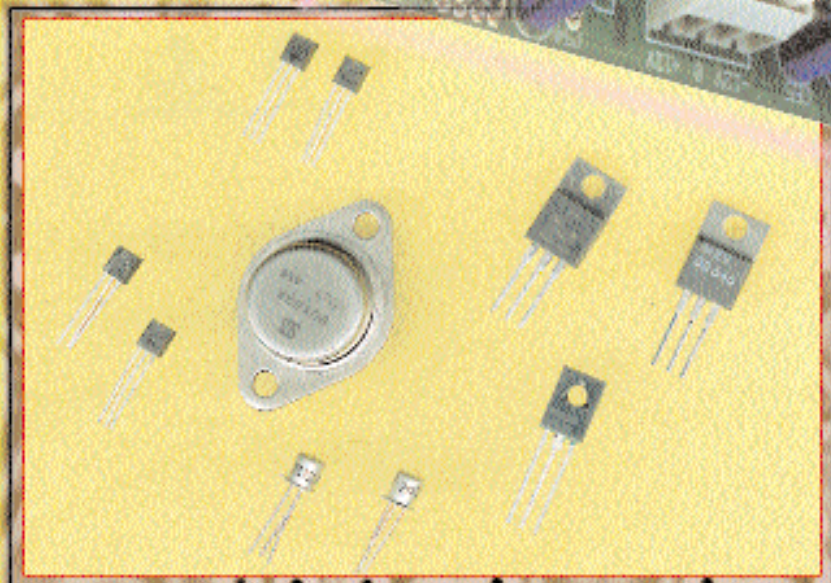


Amplificadores con transistores

6

El Mundo de la Electrónica

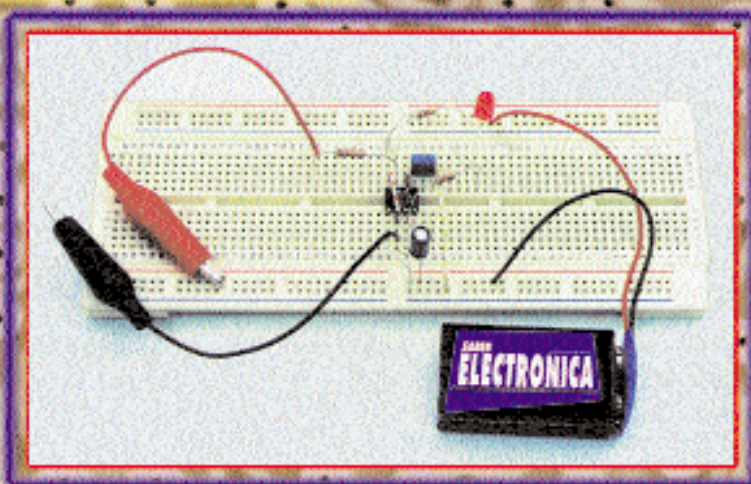
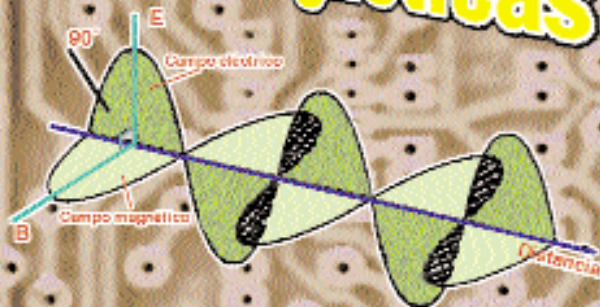
TV
AUDIO
VIDEO
MICROPROCESADORES



ES UNA EDICIÓN ESPECIAL DE

SABER
EDICIÓN ARGENTINA
ELECTRONICA

Las Ondas Electromagnéticas



Fundamentos Físicos de la Reproducción del Sonido

Enciclopedia Visual de la Electrónica

INDICE DEL CAPITULO 6

LAS ONDAS ELECTROMAGNETICAS

La naturaleza de las ondas electromagnéticas	83
Polarización.....	84
Frecuencia y longitud de onda	84
El espectro electromagnético y las ondas de radio.....	85
Espectro electromagnético.....	85

EL TRANSISTOR COMO AMPLIFICADOR AMPLIFICADORES CON TRANSISTORES

Configuraciones circuitales básicas.....	87
El amplificador base común	87
El amplificador emisor común.....	87
El amplificador colector común	90
Recta estática de carga	91
Recta dinámica de carga	92
Cálculo de los capacitores de paso	92
Acoplamientos interetapas.....	93

a) Acoplamiento RC.....	93
b) Acoplamiento a transformador.....	93
c) Acoplamiento directo.....	94

FUNDAMENTOS FISICOS DE LA REPRODUCCION DEL SONIDO

Propagación de las vibraciones u ondas	94
La onda de sonido	95
Características físicas	95
Frecuencia o tono.....	95
Amplitud	95
Intensidad.....	95
Timbre.....	95
Velocidad del sonido	96
Reproducción del sonido	96
Tipos de reproductores acústicos	96

Cupón Nº 6

Guardé este cupón: al juntar 3 de
éstos, podrá adquirir uno de los videos
de la colección por sólo \$5

Nombre: _____
para hacer el canje, fotocopie este cupón y
entréguelo con otros dos.

Capítulo 6

Las Ondas Electromagnéticas

Las ondas electromagnéticas fueron previstas antes de ser descubiertas. En verdad, las ecuaciones de Maxwell que describían los campos magnéticos preveían también la existencia de radiaciones, de la misma naturaleza que la luz, y que se propagaban en el espacio con una velocidad de 300.000 kilómetros por segundo.

Las ecuaciones de Maxwell fueron presentadas en 1865, pero solamente en 1887 Hertz consiguió comprobar la existencia de "ondas electromagnéticas" según las ya previstas y las produjo en su laboratorio.

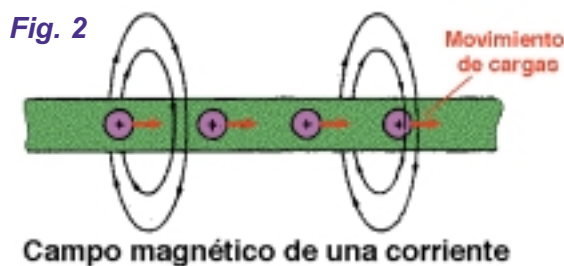
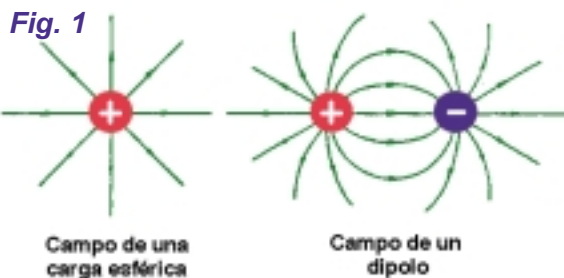
No nos preocuparemos tanto del aspecto histórico del descubrimiento, como del estudio de su naturaleza, pero también añadiremos algunos datos importantes del pasado relacionados con la investigación y su utilización.

LA NATURALEZA DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Una carga eléctrica, o un cuerpo cargado, es responsable por una perturbación en el espacio que lo rodea y que denominamos "**campo eléctrico**", como muestra la figura 1.

Vimos que podríamos representar esta "influencia" por medio de líneas imaginarias, denominadas líneas de fuerza. (El uso de las líneas de fuerza fue propuesto por Faraday).

Las líneas de fuerza realmente no existen, pero pueden ayudar a evaluar el comportamiento de la "influencia" de la carga en el espacio. La influencia es mayor en los puntos en que las líneas son más concentradas.



Del mismo modo, estudiamos otro tipo de influencia causado por cargas en movimiento, o sea, por las corrientes eléctricas, que difería mucho del campo eléctrico, y que fue denominado "**campo magnético**".

También representábamos el campo magnético por medio de líneas de fuerza pero de una forma bien diferente: las líneas eran concéntricas, envolviendo la trayectoria de las cargas (figura 2).

El tipo de influencia para los dos campos también se diferencia: el campo eléctrico actúa sobre cualquier cuerpo cargado, atraen o repelen conforme a la polaridad, mientras que el campo magnético actúa sobre determinados materiales, independientemente de su carga, atraen (materiales ferrosos) o repelen (materiales diamagnéticos).

¿Qué ocurriría con una carga eléctrica que, al mismo tiempo, pudiera producir un campo eléctrico y un campo magnético?

Para explicar este fenómeno importante, vamos a imaginar una carga eléctrica que pueda entrar en vibración alrededor de un punto, o sea que pueda "**oscilar**" como

muestra la figura 3.

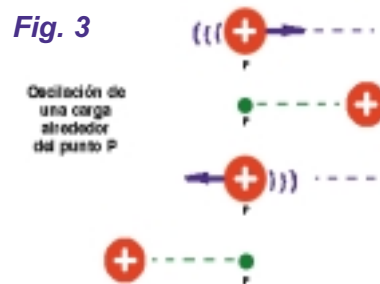
Partiendo entonces de una posición inicial en que la misma se encuentre detenida, sólo existe campo eléctrico a su alrededor, como muestra la figura 4.

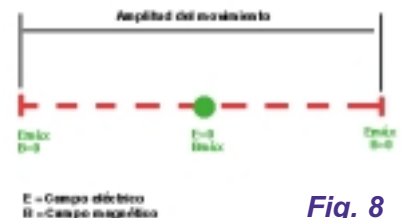
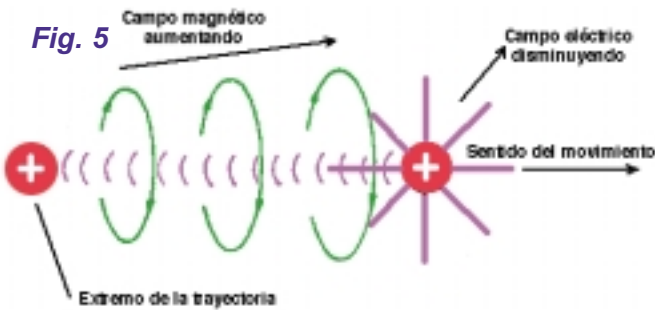
El campo magnético es nulo, pues la carga se encuentra en reposo. El campo eléctrico, a su vez, es máximo.

A medida que la carga se desplaza hacia la posición central, el campo eléctrico se reduce, mientras que el campo magnético aumenta. En el medio de la trayectoria,

cuando la velocidad es máxima, el campo magnético también es máximo, mientras que el campo eléctrico se reduce a cero (mínimo, figura 5).

En dirección al otro extremo de la trayectoria, la velocidad se reduce gradualmente, con lo que se reduce también el campo magnético. El campo eléctrico vuelve a aumentar de intensidad (figura 6).





Cuando la carga llega al extremo de la trayectoria, por algunos instantes se detiene para invertir el movimiento. En este instante, el campo eléctrico nuevamente es máximo y el campo magnético se reduce a cero (figura 7).

En la inversión del movimiento, tenemos nuevamente el crecimiento de la intensidad del campo magnético hasta el medio de la trayectoria y la reducción al mínimo del campo eléctrico y después, hasta el extremo, el aumento del campo eléctrico y la disminución del campo magnético. Vea entonces que, en esta "oscilación", el campo magnético y el eléctrico se alternan (figura 8).

Hay un desfase de 90 grados entre los dos campos.

El resultado de este fenómeno es la producción de una perturbación única que se propaga por el espacio con velocidad finita.

Vea que existe un tiempo determinado de contracción de las líneas de fuerza tanto del campo eléctrico como del magnético, así como para la expansión.

Así, independientemente de la velocidad con que la carga oscile, o sea, de su frecuencia, la velocidad con que la perturbación se propaga es bien definida y constante.

Se puede demostrar que esta perturbación se propaga en el vacío a una velocidad de $2,997793 \times 10^{10}$ centímetros por segundo, o, redondeando hacia arriba, ¡300.000 kilómetros por segundo!

Esta perturbación da origen a lo que denominamos "onda electromagnética".

Polarización

Para representar una onda electromagnética precisamos tener en cuenta tanto su componente eléctrica como magnética, pues, como vimos, la misma corresponde a una "alternancia" entre los dos campos.

Para esta finalidad, hacemos uso de la representación mostrada en la figura 9. El campo eléctrico varía según el eje E con semiciclos tanto positivos como negativos, mientras que

el campo magnético varía según el eje H, también como semiciclos positivos y negativos.

Cuando deseamos recibir una onda electromagnética, lo que tenemos que hacer es interceptarla de modo de tener una corriente en un conductor que pueda ser amplificada y trabajada por circuitos especiales. Esto se hace, por ejemplo, mediante una antena que no es más que un alambre conductor colocado en el camino de la onda (figura 10).

Para que ocurra la inducción de una corriente en esta antena, la misma debe ser colocada de determinada forma. Si los lectores observaran las antenas de televisión de su localidad, podrán tener una idea de la necesidad de esta colocación.

¿Por qué las antenas no se ponen en posición tal que las varillas estén en forma vertical como muestra la figura (B) 11, y sí como en (A) figura 11?

¡Esto ocurre porque la polarización de las ondas se hace horizontalmente, no verticalmente!

FRECUENCIA Y LONGITUD DE ONDA

Para una corriente alterna, la frecuencia se define como el número

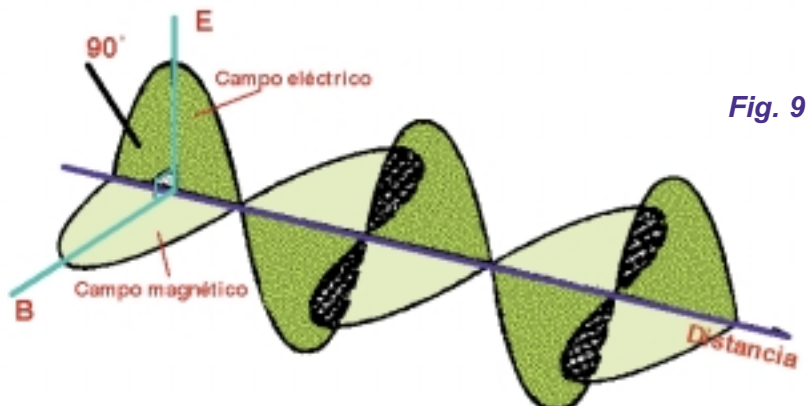
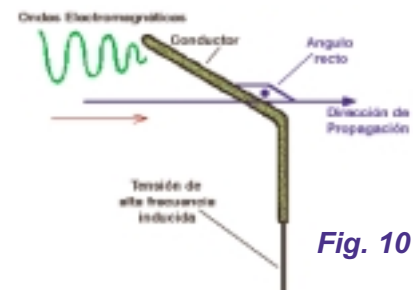
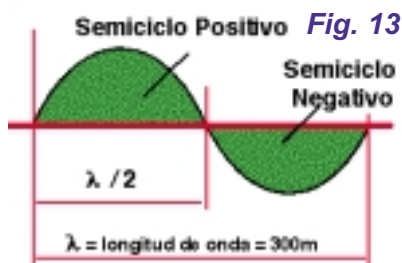
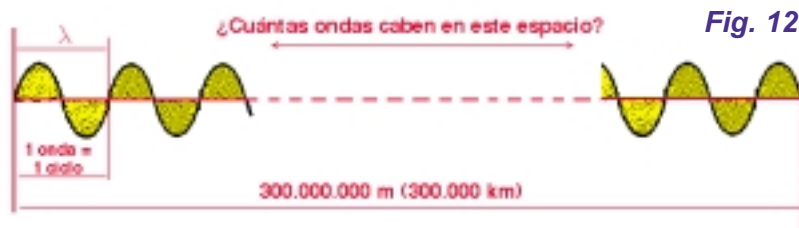
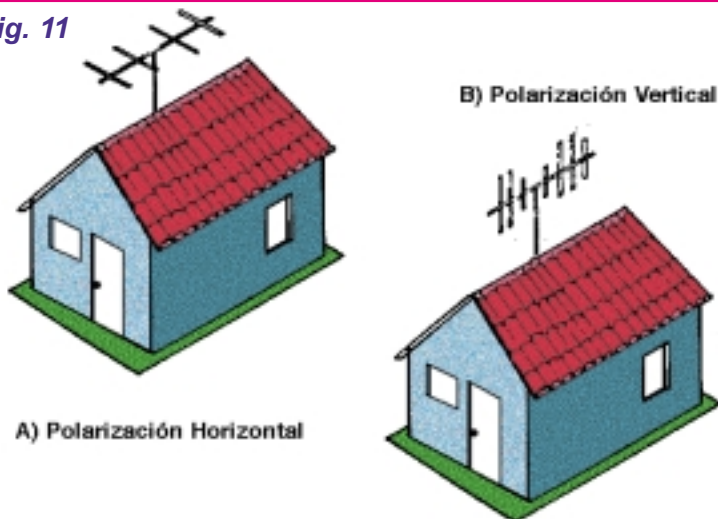


Fig. 11



de veces en que ocurre la inversión de su sentido de circulación. La frecuencia es numéricamente igual a este valor y es dada en hertz, cuya abreviatura es Hz. En el caso de una onda electromagnética, su frecuencia es dada por el número de vibraciones por segundo de la carga (o cargas) que la producen, siendo numéricamente igual a este valor y también medida en hertz.

Si una onda electromagnética fuera producida por una carga que vibra a razón de 1.000.000 de veces por segundo, la frecuencia de esta radiación será de 1MHz.

El espectro electromagnético es el conjunto de frecuencias en que puede haber radiaciones electromagnéticas y es muy extenso, se analizará más adelante. Para una determinada radiación electromagnética, además de la frecuencia, podemos definir otra magnitud, que es la longitud de onda.

Tomemos como ejemplo una radiación electromagnética cuya frecuencia sea de 1MHz, o sea, 1.000.000Hz.

En un segundo, partiendo de la fuente emisora, o sea, las cargas que oscilan, las ondas recorren un espacio de 300.000 kilómetros, pues ésta es su velocidad, como muestra la figura 12. Podemos percibir entonces que las ondas individualmente, o cada oscilación divide el "espacio" de 300.000 kilómetros o 300.000.000 metros. Cada onda, entonces, "se quedará" con un espacio de 300 metros, o sea, tendrá una "longitud" que equivale a 300 metros (figura 13).

Para las ondas electromagnéticas es común expresar su naturaleza tanto por la frecuencia como por su longitud de onda. Hablar de una radiación de 1 MHz es, pues, lo mismo que hablar de una radiación de 300 metros. Podemos fácilmente calcular la longitud de onda de cualquier radiación, conocida su frecuencia por la fórmula:

$$v = L \times f \quad (2)$$

Donde: v es la velocidad de propagación (300.000.000 m/s); L es la longitud de onda en metros; f es la frecuencia en Hertz.

¿Cuáles son las frecuencias que dan origen a las ondas electromagnéticas?

¿Qué tipo de naturaleza tiene cada radiación en función de su frecuencia?

Si distribuimos las ondas electromagnéticas de acuerdo con su frecuencia o longitud de onda, veremos que, para cada sector de esta distribución, tendremos comportamientos diferentes. Las radiaciones de longitudes de ondas menores tienen comportamientos bien diferentes de las de mayores longitudes. Su propia utilización es distinta.

Llamamos espectro a la distribución de las diversas frecuencias de radiaciones electromagnéticas, y en el caso es un espectro continuo, pues no existen saltos entre los valores que las mismas pueden asumir.

El espectro de las radiaciones electromagnéticas, en verdad, se extiende de 0 a infinito, ya que se conocen fuentes que emiten "señales" de frecuencias tan elevadas como 10^{23} Hertz, o sea 1 seguido de 23 ceros!

Vamos al análisis del espectro:

Espectro electromagnético

Frecuencia: 0 a 20kHz

Denominación: ondas eléctricas acústicas

La longitud de onda varía entre el infinito y 15.000 metros. En verdad, estas ondas no tienen mucha "penetración" en el espacio, siendo usadas para la transmisión de energía por cable, o en la producción de sonidos.

Frecuencia: 20kHz a 30kHz

Denominación: VLF (Very Low Frequency = frecuencia muy baja)

Las ondas electromagnéticas de esta banda, de 15.000 a 10.000 metros, pueden ser usadas en los servicios de telecomunicaciones a larga distancia, pues siendo muy estables, no están influenciadas por la hora del día ni por las estaciones del año.

Vea el lector que el Sol es un "enemigo" de las ondas electromagnéticas, pues la radiación que él emite también puede influenciar su propagación y dificultar el uso de determinados tipos de ondas de radio, como ésta, en mayor o menor intensidad.

Las Ondas Electromagnéticas

Frecuencia: 30kHz a 300kHz

Denominación: LF (Low Frequency = baja frecuencia)

Pueden ser usadas en servicios de radiocomunicaciones de larga distancia, como por ejemplo en comunicación naval, o incluso para ayudar en navegación al orientar naves y aviones. Estas ondas ya son más afectadas en su propagación que las de la banda anterior, pues, según la hora del día y la estación del año, pueden ocurrir pequeñas atenuaciones.

Frecuencia: 300kHz a 3.000kHz

Denominación: MF (Medium Frequency = frecuencia media)

Las ondas de esta banda, que son ondas de radio, tienen longitudes entre 1.000 y 100 metros, pudiendo ser usadas en diversos tipos de servicios de comunicación, como por ejemplo, la propia radiodifusión (AM), comunicaciones entre aeronaves, barcos, policía, etc. Estas radiaciones son influenciadas por la hora del día: su alcance es mayor durante la noche y menor durante el día. Igualmente, en invierno la atenuación es menor que en verano.

Frecuencia: 3.000 kHz a 30 MHz

Denominación: HF (High Frequency = alta frecuencia)

También tenemos aquí ondas de radio cuya longitud de onda estará entre 100 metros y 10 metros. Estas ondas pueden usarse en comunicaciones de larga distancia, en determinados horarios del día y en dependencia de las estaciones del año.

Lo que ocurre es que estas ondas pueden ser reflejadas por las capas altas de la atmósfera (la ionosfera), así vencen el problema de la curvatura de la Tierra. Las ondas de esta banda son utilizadas por las estaciones de radiodifusión, radioaficionados, y servicios diversos de comunicación a distancias largas y medianas.

Frecuencia: 30MHz a 300MHz

Denominación: VHF (Very High Frequency = frecuencia muy alta)

Son también ondas de radio cuya longitud de onda estará entre 10 metros y 1 metro. Estas ondas se propagan en línea recta, como las demás, pero son influenciadas fuertemente por la presencia de obstáculos. Así, no podemos usarlas en servicios que sobrepasen la línea visual o línea del horizonte. Las ondas de esta banda son usadas en servicios de radiodifusión (FM), televisión, comunicaciones a distancias cortas y medianas como por ejemplo policía, aviación, etc.

Frecuencia: 300MHz a 3.000MHz

Denominación: UHF (Ultra High Frequency = frecuencia ultra alta)

Estas ondas de radio tienen longitudes de onda entre 1 metro y 10 centímetros. Son pues ondas muy cortas de comportamiento semejante al VHF, con la diferencia que son mucho más afectadas por obstáculos. Estas ondas son usadas en TV, radar, comunicaciones a distancia corta y mediana.

Frecuencia: 3GHz a 30.000MHz

Denominación: SHF (Super High Frequency = frecuencia super alta)

Estas ondas tienen longitud de onda entre la banda de 10 centímetros a 1 centímetro. Estamos en el dominio de las llamadas microondas, usadas en servicios de comunicaciones en línea visual, radar, etc.

Las mismas no pueden sobrepasar obstáculos, incluso de pequeño tamaño, son pues usadas en las comunicaciones visuales, o sea, en aquellas en que el transmisor prácticamente "ve" el receptor.

Frecuencia: 30GHz a 300GHz

Denominación: Microondas

No hay realmente una sigla para las ondas de radio en esta banda. Su longitud está entre 1 mm y 10 mm y aquí el comportamiento de las radiaciones comienza a sufrir una transición. Podemos agrupar las radiaciones de esta banda en ondas centimétricas, milimétricas, e incluso submilimétricas. Su uso es el radar; las comunicaciones por microondas también son producidas por cuerpos calentados como las lámparas de vapor de mercurio. Se trata pues de radiación cuya naturaleza comienza a estar próxima a la de la luz.

Frecuencia: 300GHz (3×10^{11}) a 3×10^{14} Hz

Denominación: Radiación infrarroja o simplemente infrarrojo. Ya tenemos aquí un tipo de radiación de comportamiento bastante semejante al de la luz visible. La radiación infrarroja es producida por cuerpos calientes. Cuando acercamos la mano a un hierro caliente, "sentimos" esta radiación a la distancia en forma de calor. Las longitudes de onda son medidas en esta banda en micrones (μ), o millonésimas de metro, o bien en otra unidad que es el Angstrom (\AA) que equivale a 10^{-8} metros o a la millonésima parte del milímetro.

Frecuencia: 3×10^{14} Hz.

Denominación: Luz visible

En este punto del espectro electromagnético tenemos una forma de radiación

muy importante para nosotros que es la luz que podemos ver, o luz visible. Su longitud de onda está entre 4.000 Angstroms y 7.000 Angstroms. El color de la luz que percibimos está relacionada con su frecuencia, conforme a la siguiente tabla aproximada:

Violeta - 4.000 a 4.500 Angstrom

Azul - 4.500 a 5.000 Angstrom

Verde - 5.000 a 5.700 Angstrom

Amarillo - 5.700 a 5.900 Angstrom

Anaranjado - 5.900 a 6.100 Angstrom

Rojo - 6.100 a 7.000 Angstrom

La particularidad más importante de esta banda del espectro está, entonces, en el hecho de que poseemos "sensores" sensibles capaces de percibir las radiaciones, que son justamente nuestros ojos.

Frecuencia: 3×10^{14} a 3×10^{17}

Denominación: radiación ultravioleta o simplemente ultravioleta.

Tenemos aquí una penetrante forma de radiación electromagnética del tipo de la luz cuyas longitudes de onda están entre 4.000 Angstrom y 10^{-7} centímetros. Este tipo de radiación es producida por la vibración molecular y atómica y encuentra aplicaciones industriales de diversos tipos.

Frecuencia: 3×10^{17} a 3×10^{20} Hz

Denominación: Rayos X

Tenemos aquí una forma muy penetrante de radiación electromagnética que puede, por su longitud de onda muy pequeña, penetrar en los cuerpos materiales de diversos tipos. Esta forma de radiación es usada en medicina y en la industria de diversas formas. Cuanto menor es la longitud de onda de los rayos X, mayor es su penetración.

Frecuencia: 3×10^{20} Hz a 3×10^{21} Hz

Denominación: Rayos Gamma

Esta forma peligrosa de radiación electromagnética es producida tanto por vibraciones atómicas y moleculares como también por las reacciones nucleares. Los rayos gamma tienen enorme penetración, por lo que pueden atravesar obstáculos de concreto o plomo de bastante espesor.

Frecuencia: 3×10^{21} Hz y más

Denominación: rayos cósmicos

Son partículas de increíble penetración producidas por reacciones nucleares o aceleración en campos magnéticos de partículas cargadas y pueden atravesar toda la masa de la Tierra como si no existiera. Estas partículas son detectadas con dificultad, y felizmente llegan en poca cantidad a nuestro planeta.

El Transistor como Amplificador

Amplificadores con Transistores

Existen distintas configuraciones y existen varias formas de polarizar un transistor, cada una con sus ventajas y desventajas.

Se dice que un amplificador de audio es aquel que incrementa el nivel de una determinada señal que posee una frecuencia comprendida dentro del espectro audible (20Hz a 20kHz). Para el diseño de un amplificador interesan características tales como la potencia de salida, impedancia de carga, impedancia de entrada, nivel de la señal de entrada, tensión de alimentación, etc.

CONFIGURACIONES CIRCUITALES BÁSICAS

Básicamente, a un transistor se lo puede utilizar en tres configuraciones distintas a saber:

- a- Configuración Base Común
- b- Configuración Emisor Común
- c- Configuración Colector Común

EL AMPLIFICADOR BASE COMÚN

Las principales características son:

- Baja impedancia de entrada (entre 50 ohm y 300 ohm)
- Alta impedancia de salida (entre 100 kilohm y 1 Megohm).
- Posee alta ganancia de tensión.
- No posee ganancia de corriente.
- La señal de salida no está desfasada respecto de la de entrada.

En la figura 1 vemos el circuito de un amplificador base común.

Si observamos el circuito, la polarización del emisor es tal que la juntura base-emisor queda en directa, constituye así un circuito de muy baja resistencia de entrada (diodo en directa) que oscila entre 50 y 300Ω, mientras que el colector queda polarizado en inversa, lo que hace que la salida tenga una resistencia elevada que oscila entre 100kΩ y 1MΩ.

La ganancia de corriente:

$$\alpha = \frac{I_c}{I_e} < 1$$

α es menor que la unidad pero se asemeja a 1; varía entre 0,98 y 0,999, pero lo que aquí importa es que la ganancia de resistencia es muy grande (aproximadamente $R_s/R_e = 1500$) con lo cual la etapa posee gran ganancia de tensión. Existe una familia de curvas que caracterizan el funcionamiento de cada transistor en la configuración base común, y se llaman curvas características para conexión base común (o base a tierra, o base a masa).

Muchas veces es cómodo trabajar con una sola batería y para ello se polariza al transistor (figura 2). Los resistores de base R_b y R_a dan a la base una polarización positiva respecto de emisor a los fines de que la juntura BE quede polarizada en directa mientras que el colector es positivo respecto del emisor. C1 es un camino a masa para la señal alterna a los fines de obtener máxima señal sobre la resistencia de carga R_c . La señal a la salida está en fase con la señal de entrada, pues un aumento de la tensión de base provocará un incremento de la corriente de colector y, a su vez, aumentará la señal sobre R_c que es la carga (salida) del circuito. Observe que C1 es un cortocircuito para corriente alterna; anula los resistores R_a y R_b ya que no hay caída de tensión de señal alterna sobre éstos.

EL AMPLIFICADOR EMISOR COMÚN

En este tipo de circuito, la señal de entrada se aplica entre base y emisor del transistor. Aquí también la polarización del transistor es tal que el emisor queda polarizado en directa, condiciones imprescindibles para que el transistor funcione como tal.

Se trata de un amplificador de impedancia de entrada moderada, no muy alta impedancia de salida, posee ganancia de tensión y corriente y la señal de salida está des-

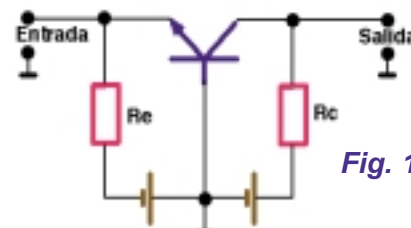


Fig. 1

fasada 180° respecto de la señal aplicada a la entrada.

Tensión de entrada = Tensión Base-emisor

Tensión de salida = Tensión Colector-Emisor

Corriente de entrada = Corriente de Base

Corriente de salida = Corriente de Colector

Desarrollemos este tema analizando el circuito de un amplificador emisor común (figura 3).

La resistencia de entrada varía con la polarización, siendo un valor normal 5.000Ω, aunque puede variar entre 100Ω y 10.000Ω, según la polarización. La resistencia de salida es moderada, es decir, unos 50.000Ω según el transistor y su polarización.

Aquí la corriente de colector se controla con la corriente de base, de aquí que con pequeñas variaciones de la corriente de base se obtengan grandes variaciones de la corriente de colector, razón por la cual, actuando como amplificador de corriente, se define lo que se llama factor β .

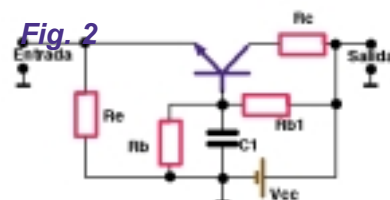
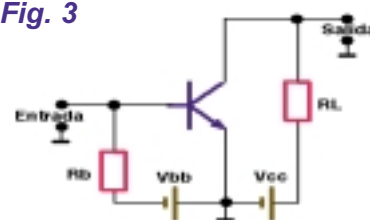


Fig. 3



$$\beta = \frac{I_c}{I_b}$$

β = Ganancia de corriente del transistor en la configuración emisor común

Por lo dicho, en un amplificador base común se utiliza el parámetro:

$$\alpha = \frac{I_c}{I_e}$$

y aquí se usa:

$$\beta = \frac{I_c}{I_b}$$

Pero la diferencia fundamental es que este circuito (emisor común) tiene ganancia de corriente y también ganancia de tensión, por lo cual se puede tener una ganancia de potencia que puede llegar a 10.000 veces (40dB), lo que lo hace muy popular. Nótese que, si al aplicar una señal de entrada aumenta la tensión de base, aumentará la I_b , lo que hará aumentar la I_c ; si esto ocurre, aumentará la caída de tensión sobre R_L y, por ley de Kirchhoff (que veremos en la próxima lección), disminuirá la tensión colector-emisor (tensión de salida) pues:

$$V_{cc} = V_{RL} + V_{ce}$$

Como V_{cc} es constante, si aumenta V_{RL} deberá disminuir V_{ce} . En síntesis, un aumento de la señal de entrada provocará una disminución (mayor) de la tensión de salida por lo cual hay una inversión de fase entre entrada y salida, al revés de lo que ocurría en un circuito Base-Común. Aquí también es necesario, a los fines de simplificar la construcción del circuito, polarizar al transistor con una sola batería o fuente de alimentación y para ello hay muchas formas de hacerlo; una de ellas es la denominada polarización fija, que consiste en colocar un resistor entre base y batería con el fin de polarizar la juntura base-emisor en directa (figura 4).

Para calcular el valor de la resistencia de base, basta con fijar un valor de corriente de base. Sabemos que habrá además una caída de tensión sobre R_L que no debe ser demasiado alta para que el colector siga siendo positivo respecto de

la base. Para hacer el cálculo de R_b se emplea la malla formada por V_{cc} , R_b y la juntura BE del transistor (figura 5).

Ejemplo

Si consideramos la $V_{be} = 0,6V$ y queremos una corriente de base de $50\mu A$ con una $V_{cc} = 6V$, la R_b debe ser de:

$$R_b = \frac{6V - 0,6V}{50 \times 10^{-6} A} = 108.000\Omega$$

Un valor comercial que se asemeje a este valor es $100k\Omega$: por lo tanto, adoptamos una $R_b = 100k\Omega$.

Es fácil notar que, pase lo que pase, la I_b permanece constante frente a variaciones de temperatura o por cambios de transistor pues para todos los transistores $V_{be} = 0,6V$ (Si) o $V_{be} = 0,2V$ (Ge) aproximadamente.

$$\beta = \frac{I_c}{I_b}$$

Con lo cual:

$$I_c = \beta \cdot I_b$$

Ocurre que todos los transistores "no" son iguales y su β puede variar por cambios de temperatura (además de variar entre transistores), con lo cual, si es fundamental que I_c no varíe, tendría que cambiar el valor de R_b cada vez que se cambia de transistor, lo que complica el análisis.

Esto hace que la polarización fija no sea la más adecuada, ya que es inestable frente a cambios de transistores y frente a variaciones de temperatura, por lo que resulta imposible mantener fija la corriente típica de colector.

Para solucionar en parte este problema, se utiliza la polarización automática que consiste en conectar el resistor R_b entre base y colector, que cumple la función de "sen-sar" la tensión entre colector y base para polarizar a ésta. Es decir, existe una realimentación desde el colector hacia la base (realimentar significa tomar una muestra de alguna parte del circuito y enviarla a otra parte del circuito con el fin de variar alguna característica del mismo). La polarización automática, aunque tiene la desventaja de disminuir la

Fig. 4

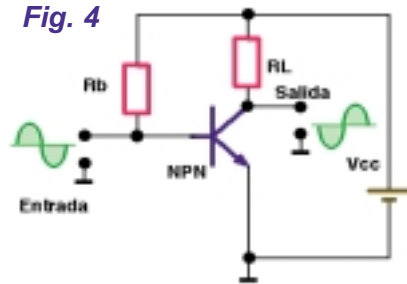


Fig. 5

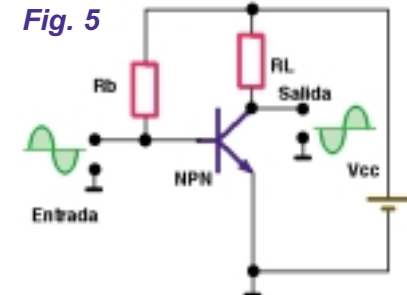


Fig. 6

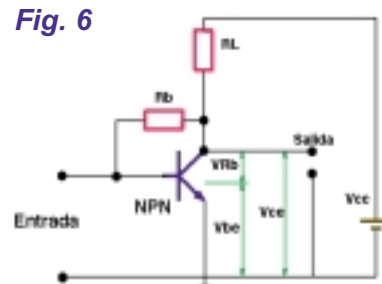
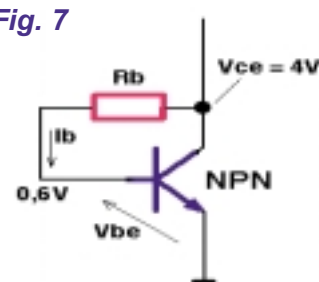


Fig. 7



ganancia del amplificador, mejora algunas fallas de la polarización fija (figura 6). Para calcular el valor de R_b debemos saber cuál es el valor de tensión que pretendemos que exista en colector y cuál es la corriente que circulará por la base.

Analizando el circuito y aplicando Kirchhoff puede deducirse que:

$$R_b = \frac{V_{ce} - V_{be}}{I_b}$$

Si se desea tener una tensión entre colector y emisor $V_{ce} = 4V$ con una corriente de base de $I_b = 50\mu A$, debemos colocar una R_b (figura 7), que se calcula:

$$R_b = \frac{4V - 0,6V}{50 \times 10^{-6} A} = 68.000\Omega$$

Casualmente, esta vez el valor calculado para $R_b = 68k\Omega$ coincide con un valor comercial.

Para calcular la polarización de un circuito con polarización automática se debe recurrir al circuito de entrada (figura 8). Se deduce que:

$$V_{cc} = V_{Rc} + V_{Rb} + V_{be}$$

Si consideramos que I_c es mucho mayor que I_b se puede decir que:

$$V_{Rc} = I_c \cdot R_c ; \quad V_{Rb} = I_b \cdot R_b$$

Luego:

$$V_{cc} = I_c \cdot R_c + I_b \cdot R_b + V_{be}$$

Reemplazando la relación:

$$I_b = \frac{I_c}{\beta} \quad V_{cc} = I_c \cdot R_c + \frac{I_c}{\beta} \cdot R_b + V_{be}$$

Si se trabaja matemáticamente, se llega a:

$$I_c = \frac{V_{cc} - V_{be}}{R_c + \frac{R_b}{\beta}} \quad (1)$$

En la fórmula de cálculo de I_c se ve que ahora el β no influye tanto sobre el valor de la corriente de colector, razón por la cual no hay grandes variaciones de I_c con la temperatura o por cambios del transistor.

Aunque la variación de β sea grande debido a que se cambió el transistor o hubo una variación de temperatura, el circuito no se verá afectado, dado que I_c permanece casi constante.

Sea el caso ahora, del circuito de la figura 9. Q es un transistor de silicio ($V_{be} = 0,6 \text{ V}$) que posee un $\beta = 200$. Aplicando la fórmula (1), obtenemos:

$$I_c = \frac{12\text{V} - 0,6\text{V}}{\frac{22.000\Omega}{200} + 1.200\Omega} =$$

$$I_c = \frac{12\text{V} - 0,6\text{V}}{110\Omega + 1.200\Omega} =$$

$$I_c = \frac{11,4\text{V}}{1310\Omega} = 8,7\text{mA}$$

Supongamos que hay una variación del 50% del β por cualquier causa, lo que lo lleva a un valor $\beta' = 300$, nos preguntamos, ¿variará mucho la corriente de colector? Para aplacar dudas, calculemos el nuevo

valor de I_c .

$$I_c = \frac{V_{cc} - V_{be}}{R_c + \frac{R_b}{\beta}}$$

$$I_c = \frac{11,4\text{V}}{1200\Omega + \frac{22.000\Omega}{300}}$$

$$I_c = \frac{11,4\text{V}}{1.200\Omega + 73,3\Omega} = 8,95\text{mA}$$

Se puede comprobar entonces que una variación del 50% en el valor del β provoca en este caso una variación inferior al 5% en la corriente del colector, lo que indica que ha aumentado la estabilidad del circuito. En este circuito la realimentación negativa también estará presente para la señal alterna que deseamos amplificar; es decir, existe una disminución en la ganancia del circuito, pero la estabilidad lograda compensa ampliamente esta pequeña desventaja ya que, con el precio actual de los transistores, si necesitamos mayor ganancia, siempre podemos recurrir a más etapas en amplificación. Como vemos, logramos estabilidad térmica bajando la ganancia del sistema.

Si consideramos despreciable la corriente de base frente a la corriente de colector, podemos calcular la tensión colector-emisor de la siguiente manera (figura 10):

$$V_{cc} = V_{Rc} + V_{ce}$$

Como $I_c \gg I_b$; trabajando matemáticamente:

$$V_{ce} = V_{cc} - I_c \cdot R_c$$

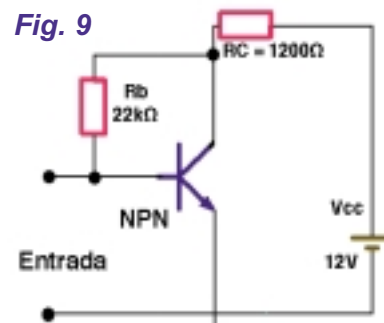
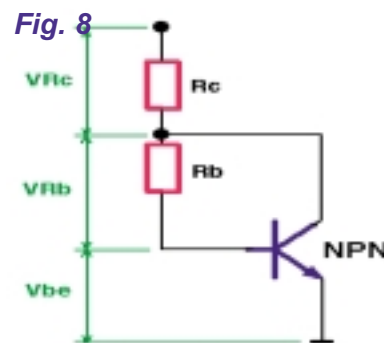
$$V_{ce} = V_{cc} - \frac{V_{cc} - V_{be}}{R_c + \frac{R_b}{\beta}} \cdot R_c$$

Aplicando esta fórmula al ejemplo que hemos analizado, podremos conocer cuánto vale la tensión colector-emisor.

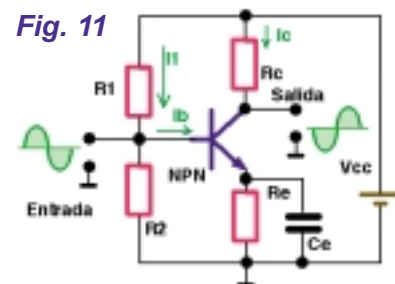
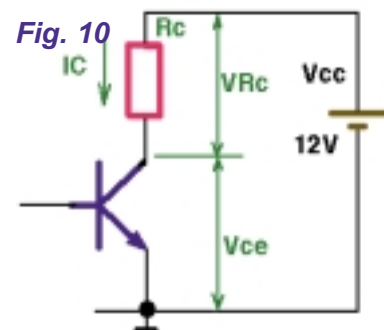
$$V_{ce} = 12\text{V} - 8,7\text{mA} \cdot 1,2k\Omega = 1,56\text{V}$$

La baja tensión V_{ce} indica que el transistor está operando cerca de la zona de saturación. Recordemos que esta zona tiene su límite para una $V_{ce} \approx 1\text{V}$.

Para otras aplicaciones resulta



necesario graduar la ganancia de la etapa a voluntad (ganancia de tensión) y además que el circuito sea térmicamente estable; para ello suele utilizarse una realimentación de corriente en el circuito de polarización, por medio de la colocación de un resistor en el emisor del transistor. En el circuito así constituido cualquier aumento en la corriente de colector por alguna causa, desarrollará una tensión sobre el resistor de emisor tal que, si la tensión de base permanece constante, polariza en forma inversa la juntura Base-Emisor que compensará la variación de la corriente de colector.



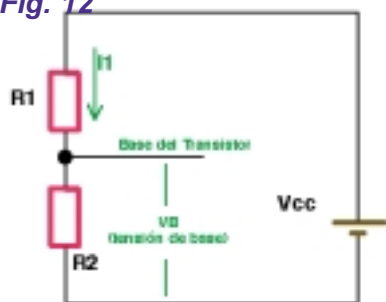
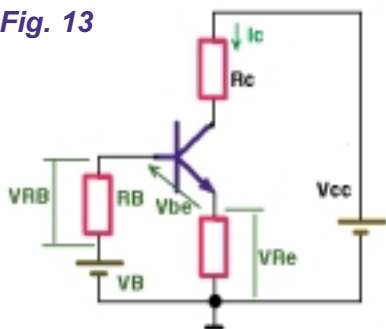


Fig. 13



Veamos lo siguiente, la polarización de la base es $V_{cc} \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$ o sea no depende de ningún parámetro del transistor. Un aumento de I_c aumenta V_{Re} que es la caída sobre R_e (ver figura 11). Para calcular la corriente de colector es necesario conocer el valor de la tensión de la base respecto de masa y la resistencia que "ve" la base.

El cálculo se facilita si consideramos que l_1 es mucho mayor que l_b .

Dibujando la batería del otro lado se comprenderá mejor el circuito de entrada (figura 12) :

$$I_1 = \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2}$$

$$V_B = I_1 \cdot R_2$$

Reemplazando:

$$V_B = \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} \cdot R_2 \quad (2)$$

El desarrollo que estamos haciendo es una aplicación del teorema de Thevenin que dice que cualquier circuito puede ser reemplazado por un generador de tensión en serie con una resistencia. Aplicando este teorema al circuito que está conectado entre base y masa del transistor, tenemos que R2 está conectada a la base junto con R1 y Vcc.

Ahora bien, el generador de ten-

sión VB se calcula como la tensión que cae entre base y masa del transistor cuando éste ha sido desconectado; esta tensión es la que cae sobre R2 y es la VB, fórmula (2).

En tanto la resistencia de Thevenin RB la calculamos con el transistor desconectado y cortocircuitando la fuente de alimentación (II). Observe el circuito de la figura recién vista, donde al cortocircuitar la fuente de continua (Vcc) R1 y R2 quedan conectados en paralelo.

$$R_B = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (3)$$

En la figura 13 vemos qué ocurre si reemplazamos VB y RB en el circuito de la figura 11. Lo hecho no es más que una aplicación del teorema de Thevenin para simplificar el cálculo de la corriente de colector.

Aplicando Kirchhoff en el circuito de la figura, se tiene:

$$V_B = V_{RB} + V_{be} + V_{Re}$$

$$V_B = I_b \cdot R_b + V_{be} + I_e \cdot R_e$$

Como $I_c \approx I_e$

$$V_B = I_b \cdot R_B + V_{be} + I_c \cdot R_e$$

También $I_b = \frac{I_c}{\beta}$

$$V_B = \frac{I_C}{\beta} \cdot R_B + V_{be} + I_C \cdot R_e$$

$$V_B = I_C \cdot \left(\frac{R_B}{\beta} + R_E \right) + V_{BE}$$

Despejando:

$$I_C = \frac{V_B - V_{be}}{\frac{R_B}{\beta} + R_E}$$

Donde:

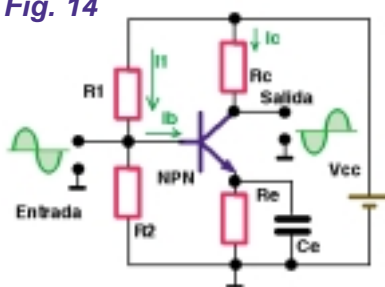
VB y RB se calculan por medio de las fórmulas (2) y (3).

$V_{be} = 0,2V$ para el germanio y $0,7V$ para el silicio.

β ganancia de corriente en emisor común dado por el fabricante.

Para que la señal alterna no desarrolle una tensión sobre el resistor R_e , se coloca un capacitor de desacople entre emisor y masa. De esta forma el capacitor en paralelo con R_e deriva la señal de CA a masa pa-

Fig. 14



ra impedir pérdidas de ganancia. En síntesis, el agregado de Re tiende a estabilizar la corriente de colector.

Dado que generalmente $R_E \gg R_B/b$, si varía el b , I_C se mantiene constante, entonces hay mayor estabilidad (figura 14). De la misma forma que hemos procedido anteriormente, podemos calcular la tensión Colector-Emisor aplicando Kirchhoff en el circuito de salida.

$$V_{CC} = V_{RC} + V_{CE} + V_{RE}$$

$$V_{CC} = I_C \cdot R_C + V_{CE} + I_C \cdot R_E$$

$$V_{CC} = I_C (R_C + R_E) + V_{CE}$$

$$V_{ce} = V_{cc} - I_c (R_C + R_e)$$

En síntesis, el agregado de Re proporciona una estabilidad adicional al circuito ya que permite sensar la corriente de emisor.

Se conecta un capacitor en paralelo para que la corriente alterna se derive a masa por él sin producir caída de tensión alterna sobre R_e , lo que disminuiría la ganancia.

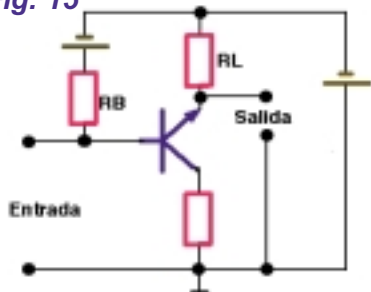
Existen otras polarizaciones para la configuración emisor común pero todas ellas buscan mayor ganancia de tensión y aumento en la estabilidad del circuito que son los factores determinantes para la elección del circuito adoptado para cada caso.

EL AMPLIFICADOR COLECTOR COM N

En este circuito la señal de entrada se aplica entre colector y base que, como sabemos, es una juntura polarizada en inversa para que el transistor trabaje correctamente: de esta manera se logra que la impedancia de entrada de un transistor en esta configuración sea muy alta (resistencia elevada), mientras que la salida se toma entre colector y emisor, siendo la impedancia de salida bastante baja.

Esta etapa posee una ganancia de potencia bastante baja compa-

Fig. 15



rada con la que se puede obtener en una etapa emisor común.

La tensión de salida es siempre menor que la tensión de entrada: por lo tanto, la ganancia de tensión es menor que la unidad. Este circuito se utiliza como elemento adaptador de impedancias (figura 15).

Acomodamos el circuito para poder verlo como comúnmente se utiliza (figura 16). Si aumenta la señal de entrada, aumenta la corriente de emisor y por lo tanto la señal sobre la RC con lo cual, como ocurre en la configuración base común, aquí no hay inversión de fase.

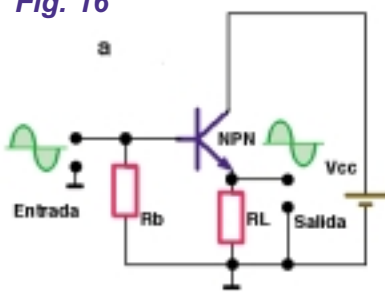
RECTA ESTÁTICA DE CARGA

Los transistores pueden ubicar su funcionamiento en una zona de trabajo donde su respuesta es lineal, una zona denominada "ZONA DE CORTE" y una tercera zona que determina la "SATURACION" del transistor. Se debe establecer un punto de funcionamiento del transistor dentro de su región activa (zona lineal) con el objeto de obtener a la salida del amplificador una señal réplica de la de entrada pero de mayor amplitud. El punto de reposo del transistor, que hemos aprendido a calcular para las distintas polarizaciones, se debe hallar sin aplicar señal externa y se lo llama punto "Q" de funcionamiento, punto de reposo o simplemente punto de trabajo.

Ubicando este punto Q sobre las curvas características de salida del transistor y aplicando métodos gráficos se puede predecir el comportamiento del amplificador cuando se le aplica una señal a la entrada. Si la señal de salida no es fiel a la ingresa, lo más probable es que no se haya elegido correctamente el punto de reposo.

Al polarizar un transistor se debe

Fig. 16



elegir los componentes asociados (resistores, alimentación, etc.) con sumo cuidado, ya que el punto Q no debe quedar en cualquier parte de la zona activa del transistor. Se debe tener en cuenta las especificaciones dadas por el fabricante, tales como Potencia Máxima de Disipación ($P_{c\ max}$), Tensión Máxima de Colector ($V_{c\ max}$), Corriente Máxima de Colector ($I_{c\ max}$), Factor β de Amplificación, etc (figura 17).

Para pequeñas señales, si el transistor está bien polarizado se puede asegurar que la tensión de salida no será distorsionada, "pero no es la misma la tensión de colector que la señal de salida", ya que esta última no debe poseer generalmente una componente de continua, razón por la cual se colocan capacitores de desacople a la salida del circuito (y también a la entrada) lo que obliga a analizar el circuito sin componente continua y con componente continua (figura 18). En este circuito, la tensión de continua del colector del transistor no aparece sobre la resistencia de carga R_L a causa del bloqueo impuesto por C_{b2} pero la señal sobre R_L es una réplica amplificada de la señal de entrada.

Los valores de los capacitores deben ser tales que a la frecuencia mínima de trabajo no ofrezcan resistencia apreciable al paso de la señal. Para la ubicación del punto de trabajo se recurre generalmente a métodos gráficos, se usan las curvas de salida del transistor en la configuración en que se esté utilizando el dispositivo.

Si se conocen los elementos asociados a la salida del transistor pueden calcularse los resistores de polarización de

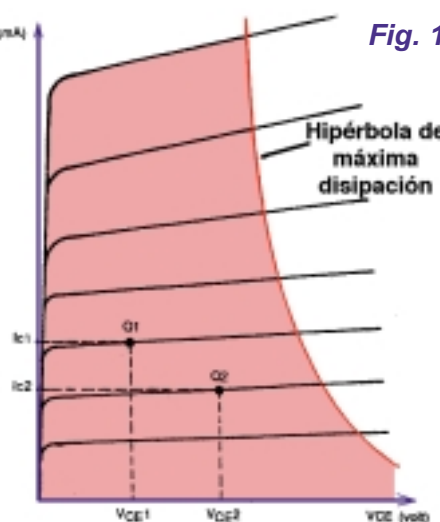
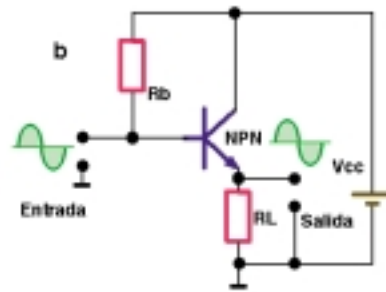


Fig. 17

base, previa ubicación del punto de reposo del transistor, partiendo de la denominada **RECTA ESTÁTICA DE CARGA** del transistor (figura 19). Para trazar esta recta sobre la familia de curvas, se obtiene la ecuación de la malla de salida del circuito. Por ejemplo, en el circuito de un transistor en emisor común con polarización por divisor resistivo se tiene que:

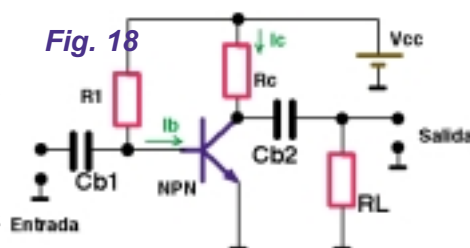
$$V_{cc} = V_{ce} + I_c (R_c + R_e) \quad (4)$$

En esta ecuación, V_{cc} , R_c y R_e son valores conocidos mientras que V_{ce} e I_c son variables.

En geometría se estudia que la ecuación (4) representa una recta y para trazarla hace falta conocer dos puntos de dicha recta. Los puntos elegidos serán:

a) para $V_{ce} = 0$ debemos calcular el valor de I_c . De la fórmula (4):

Fig. 18



$$V_{cc} = 0 + I_c (R_c + R_e)$$

despejando:

$$I_c = \frac{V_{cc}}{(R_c + R_e)}$$

b) Cuando $I_c = 0$, de la fórmula (4):

$$V_{cc} = V_{ce} + 0 (R_c + R_e)$$

$$V_{cc} = V_{ce}$$

Es decir, los dos puntos elegidos para trazar la recta serán:

a) $(I_c; V_{ce}) \Rightarrow \left(\frac{V_{cc}}{(R_c + R_e)}; 0 \right)$

b) $(I_c; V_{ce}) \Rightarrow (0; V_{cc})$

Si ubicamos estos puntos sobre las curvas de salida del transistor y trazamos una recta que pase por ellos, encontraremos la recta estática de carga del circuito (figura 20).

Esta recta es útil porque no importa que varíe la corriente de base como consecuencia de la aplicación de una señal, los valores de I_c y V_{ce} se ubicarán sobre dicha recta. Además, conociendo los valores máximos de la señal a aplicar y trasladándolos al gráfico se podrá calcular cuáles son los valores correspondientes de la corriente de colector.

RECTA DINÁMICA DE CARGA

Se ha visto que por métodos gráficos se pueden predecir los distintos valores de I_c y V_{ce} que puede tomar un transistor polarizado cuando se le aplica una señal de entrada, pero en el razonamiento no se ha tenido en cuenta la carga que se le aplica al circuito a través de un capacitor.

La Recta Estática de Carga es muy útil para analizar el funcionamiento del circuito sin que a éste se le aplique señal, es decir, donde se ubicaría el punto de reposo si hubiese algún corrimiento de algún parámetro a causa de determinados factores, como por ejemplo la temperatura. Analicemos el circuito de la figura 21. Cuando se aplica una señal de corriente alterna, C_2 es un corto circuito; lo mismo ocurre con el capacitor de desacople de emisor C_E y la fuente de alimentación (por consi-

derarla como un capacitor cargado de alta capacidad). De esta manera el emisor estará conectado a masa y R_c estará en paralelo con la carga R_L . Para analizar el comportamiento del circuito para señales alternas gráficamente es necesario construir una **RECTA DINÁMICA DE CARGA** que contemple el paralelo entre R_c y R_L y ahora $R_E = 0$ a causa de la muy baja impedancia que pasa a tener C_E .

Para trazar la Recta Dinámica de Carga se tiene en cuenta el punto de reposo del transistor ya que sin señal se ubicará sobre dicho punto. La técnica consiste en trazar una recta que pase por el punto Q con pendiente $1/R_d$, siendo R_d el paralelo entre R_c y R_L (figura 22).

$$R_d = \frac{R_c \cdot R_L}{R_c + R_L}$$

CÁLCULO DE LOS CAPACITORES DE PASO

Hemos dicho que tanto los capacitores de acoplamiento de entrada y salida, como el capacitor de desacople de emisor, se deben comportar como un cortocircuito para la señal de trabajo. La forma de cálculo de estos capacitores está íntimamente ligada con la impedancia del circuito "que ven estos elementos" ya que el efecto resistivo debe ser mucho menor que dicha impedancia para todas las señales que se desean amplificar.

La reactancia de un capacitor se calcula como:

$$X_C = \frac{1}{2 \pi \cdot f \cdot C}$$

De aquí se deduce que, en la medida que aumenta la frecuencia de la señal tratada, menor será el efecto de oposición del capacitor al paso de las señales. Por lo tanto, el peor caso se presenta con las señales de menor fre-

cuencia, donde el capacitor puede que no se comporte como un cortocircuito. Para calcular el valor del

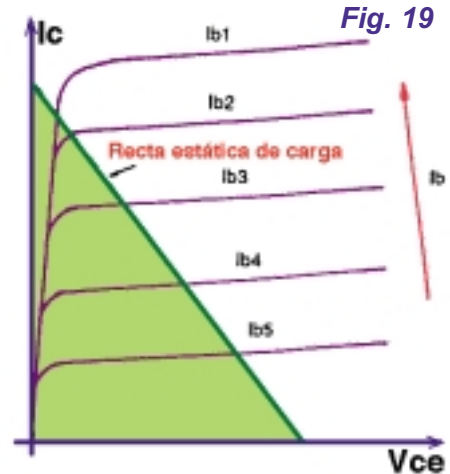


Fig. 19

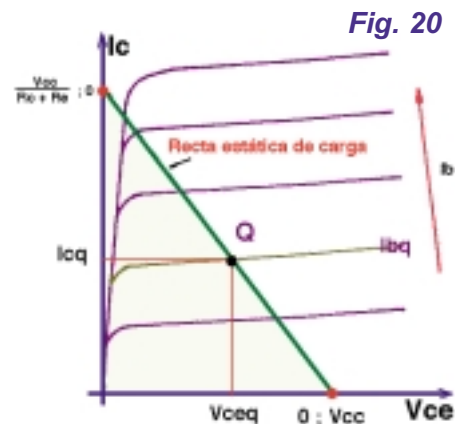


Fig. 20

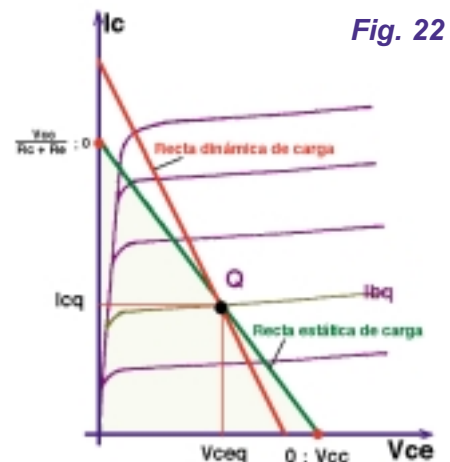
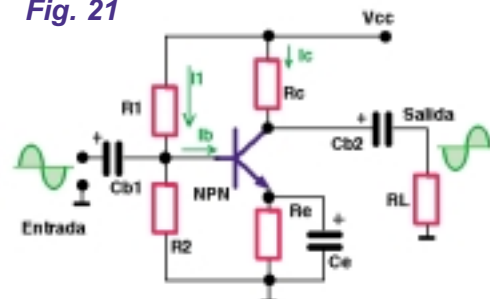


Fig. 22

Fig. 21



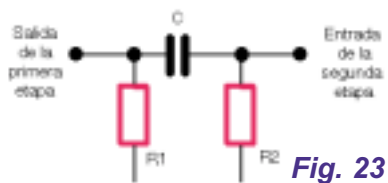


Fig. 23

capacitor necesario, éste debe tener una “resistencia” (en realidad reactancia) 10 veces menor que el valor de la impedancia que él verá a la mínima frecuencia de trabajo del amplificador. Por ejemplo, si la impedancia de entrada de un amplificador es de 5.000Ω , el capacitor de paso de entrada no debe presentar una reactancia superior a 500Ω para la frecuencia mínima de operación.

Para explicar esto mejor con un ejemplo, podemos calcular el valor del capacitor de desacople de una resistencia de emisor de 100Ω si la mínima frecuencia de operación del transistor será de 20Hz.

Sabemos que:

$$X_c = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$$

y que:

$$X_c = \frac{R_e}{10}$$

luego:

$$\frac{R_e}{10} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$$

despejando:

$$C_e = \frac{10}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R_e}$$

Si queremos dar el valor del capacitor en μF multiplicamos el segundo término por 10^6 , luego:

$$C_e [\mu F] = \frac{10^7}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R_e}$$

Reemplazando valores:

$$C_e [\mu F] = \frac{10^7}{6,28 \cdot 20\text{Hz} \cdot 100\Omega} =$$

$$C_e [F] = \frac{10^7}{12,56 \cdot 10^3} = 796 F$$

En general el valor de R_e es mayor, al igual que la frecuencia mini-

ma de operación, con lo cual el valor C_e disminuye bastante. Valores normales están comprendidos entre $50\mu F$ y $220\mu F$.

Del mismo modo se pueden calcular los capacitores de paso (CB1 y CB2) obteniéndose valores normales que oscilan entre $10\mu F$ y $100\mu F$.

Acoplamientos Interetapas

Para conectar el transductor de entrada al amplificador, o la carga u otra etapa es necesario un medio de acoplamiento que permita adaptar impedancias para que exista máxima transferencia de energía. Los acoplamientos interetapas más utilizados son:

- a) Acoplamiento RC
- b) Acoplamiento a transformador
- c) Acoplamiento directo

a) Acoplamiento RC:

Este tipo de acoplamiento es muy utilizado aunque con él no se produce una perfecta adaptación de impedancias y por lo tanto, no habrá máxima transferencia de energía. Separa totalmente la señal de los circuitos de polarización (figura 23). El resistor R1 puede ser el resistor de carga (o polarización) de la primera etapa mientras que R2 puede ser el resistor de polarización de base, si la segunda etapa es un transistor. El capacitor C deja pasar las señales alternas provenientes de la primera etapa y evita que la tensión de polarización quede aplicada en la entrada de la segunda etapa. La capacidad del capacitor C tiene que ser la adecuada a las frecuencias de las señales que se desean amplificar; por ejemplo, para acoplar etapas de audio su valor debe ser elevado (algunos microfarad) para que su reactancia sea pequeña a la menor frecuencia que se desea amplificar. Una capacidad pequeña ofrecería una reactancia elevada al paso de las bajas frecuencias, por lo que éstas quedarían atenuadas. Si se desea acoplar etapas amplificadoras con transistores usando capacitores electrolíticos, la posición del capacitor dependerá de la polaridad de los transistores. Veamos

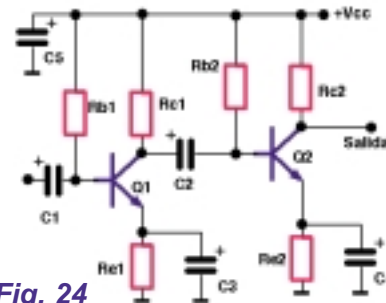


Fig. 24

un ejemplo en la figura 24. Con transistores NPN la base es menos positiva que el colector; por lo tanto, el capacitor electrolítico se conecta con el positivo del lado del colector de la primera etapa. Generalmente se utiliza un acoplamiento con resistor y capacitor en etapas amplificadoras de audio de bajo nivel.

b) Acoplamiento por Transformador

El acoplamiento a transformador se utiliza con el fin de obtener máxima ganancia de potencia; para ello deben adaptarse las impedancias de entrada y de salida del transistor.

En la figura 25 vemos un circuito acoplado a transformador:

Se emplea un transformador reductor T1 para acoplar la entrada del transistor con lo cual, si bien hay una disminución de la tensión aplicada (por ser un transformador reductor), hay un mayor suministro de potencia ya que, por el teorema de máxima transferencia de potencia, se logrará transferir máxima energía cuando las partes están perfectamente adaptadas (igual impedancia). Para adaptar la salida también usamos un transformador reductor ya que el parlante posee baja impedancia, en contraposición con la alta impedancia del colector del transistor. Este T2 adapta las impedancias de colector y parlante, así permite que la potencia entregada al

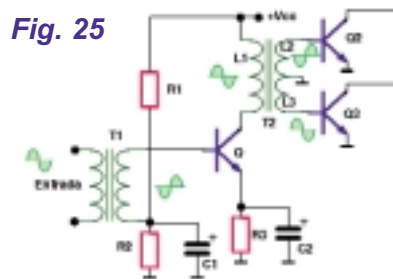
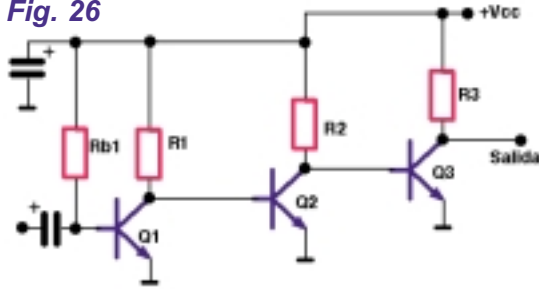


Fig. 25

Fig. 26



parlante sea máxima. En este circuito se tiene una polarización por divisor de tensión, donde R1 y R2 dan la polarización adecuada a la base, y Re da la estabilización necesaria para evitar problemas por cambios en los parámetros del transistor; C1 se coloca para evitar que la señal se atenúe sobre R1, y C2 para impedir que la señal se desarrolle sobre Re, así el rendimiento del circuito aumenta. En síntesis, un acoplamiento a transformador permite adaptar impedancias y aísla niveles de continua, pero posee la desventaja fundamental de que sus características varían con la frecuencia, razón por la cual suele distorsionar (aunque muy poco) a todas aquellas señales

que no están compuestas por una sola frecuencia. Además, es pesado y de gran tamaño; si se quiere disminuir las pérdidas, el costo aumenta considerablemente.

c) Acoplamiento Directo

Este tipo de acoplamiento consiste en unir dos etapas por medio de un cable. En principio, este método es ideal porque resulta económico y no sufre las atenuaciones que introduce todo capacitor en bajas frecuencias. En sistemas amplificadores, el método consiste en conectar el colector de un transistor con la base del siguiente (figura 26). El principal problema de este circuito radica en que los niveles de continua del colector de un transistor y de la base del transistor siguiente son iguales, razón por la cual la tensión de colector de los transistores es bajísima limitando así su funcionamiento. Para solucionar este problema se puede polarizar el primer transistor

en configuración colector común, lo que significa que la señal ingresa por la base y sale por el emisor. Para ello se conecta el emisor de la primera etapa a la base de la etapa siguiente.

Podemos conectar dos etapas amplificadoras en emisor común a través de un resistor, considerando este acoplamiento como directo; permite trabajar con distintos niveles de continua entre colector del primer transistor y base del segundo, pero presenta el inconveniente de disminuir el rendimiento.

Las ventajas del acoplamiento directo son aprovechadas en la mayoría de los equipos de audio, ya sea en aquellos que utilizan circuitos integrados o en circuitos de excelente diseño. En la actualidad son muy pocos los equipos de buenas características que no utilizan este acoplamiento. Otra forma de acoplamiento muy difundido en la actualidad es el "Acoplamiento complementario" que se basa en el uso de un transistor NPN y otro PNP, tema del que nos ocuparemos más adelante.

Fundamentos Físicos de la Reproducción del Sonido

El dispositivo universal que se utiliza para la reproducción del sonido, son los parlantes, que son elementos terminales que convierten en ondas sonoras las señales resultantes de los procesos electrónicos previos. Para entender el principio de operación de los parlantes, primero se requiere definir qué son estos elementos y qué es el sonido.

El parlante es **un transductor capaz de transformar una señal de corriente eléctrica en una onda de sonido audible**. Por su parte, el sonido es un fenómeno físico que estimula el sentido del oído mediante cambios en la presión del aire. En los seres humanos, esto ocurre siempre que una vibración con frecuencia comprendida entre los 20 y los 20,000Hz llega al oído interno.

Para llegar al oído interno, las vibraciones viajan por el aire. A veces, el término **sonido** se emplea

únicamente para las vibraciones que se transmiten de este modo; sin embargo, los físicos modernos también suelen utilizarlo para designar a las vibraciones similares que se desplazan a través de medios líquidos o sólidos. A las ondas que se encuentran por debajo del límite audible de 20Hz se les conoce como **infrasónicas**, mientras que los sonidos con frecuencias superiores a 20,000Hz se denominan **ultrasonidos**.

PROPAGACIÓN DE LAS VIBRACIONES U ONDAS

En general, las vibraciones u ondas del sonido se propagan de forma transversal o longitudinal. En ambos casos, la energía y el ritmo del movimiento ondulatorio sólo se propagan a través del medio en

cuestión; es decir, ninguna parte de éste se desplaza físicamente en la dirección de propagación para permitir el viaje de la onda. Por ejemplo, si atamos una cuerda a un punto fijo (un poste), la estiramos sin aplicar demasiada fuerza y la sacudimos, una onda se desplazará del extremo que estamos sujetando hasta su otro extremo; al llegar al punto fijo, la onda se reflejará y viajará de regreso hasta nuestra mano.

Este tipo de movimiento ondulatorio se denomina "**onda transversal**". Del mismo modo, si tiramos una piedra a un estanque, una serie de ondas transversales se propagará desde el punto de impacto.

Entonces, cualquier objeto que flote cerca de este punto se moverá hacia arriba y hacia abajo, de acuerdo con la dirección y fuerza del movimiento ondulatorio; pero apenas mostrará movimiento longi-

Al caer en el agua, la piedra genera ondas transversales

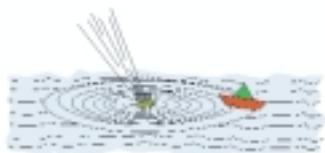
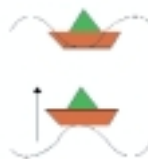


Fig. 1



tudinal, o sea un desplazamiento (figura 1).

La ONDA DE SONIDO

Una onda de sonido es una onda longitudinal. A medida que la energía del movimiento ondulatorio se propaga alejándose del centro de la perturbación, las moléculas de aire individuales que transportan al sonido se mueven hacia delante y hacia atrás, de forma paralela a la dirección de dicho movimiento.

Si un cuerpo se desplaza ligeramente hacia adelante, momentáneamente el aire frente a él se comprime, pero de forma instantánea trata de recuperar su densidad normal; por lo que la compresión comienza a viajar en la misma dirección del movimiento inicial, pero con la distancia se va diluyendo poco a poco. Exactamente esto sucede cuando el mismo cuerpo retrocede a su sitio original, pero ahora generando una pequeña porción de baja densidad, que viaja con las mismas características de la anterior.

Combinando ambos efectos, cuando un objeto está vibrando rápidamente, frente a él se genera una serie de zonas donde la densidad del aire varía dependiendo del grado de desplazamiento original del cuerpo, formando una serie de ondas que se van alejando del punto de origen. Estas sucesivas zonas de aire comprimido y enrarecido son captadas por el tímpano, el cual reproduce en escala pequeña los desplazamientos originales del cuerpo vibrante, y transmite al oído interno esta información, donde el cerebro lo interpreta como sonido. Quiere decir que una onda de sonido es una serie de compresiones y rarefacciones sucesivas del aire. Cada molécula transmite la energía a la molécula que le sigue; una vez que la onda de sonido termina de pasar,

las moléculas permanecen más o menos en la misma posición (figura 2).

Características Físicas

Una nota musical, por ejemplo, puede ser definida en su totalidad, mediante tres características con que se percibe: **el tono, la intensidad y el timbre**. Estos atributos corresponden exactamente a tres características físicas: **la frecuencia, la amplitud y la composición armónica o forma de onda**.

Frecuencia o tono

Por frecuencia del sonido se entiende el número de ciclos de una onda por segundo. Conforme mayor sea la frecuencia de una onda, más agudo se escuchará el sonido; y al contrario, conforme menor sea la frecuencia de la misma, más grave se escuchará el sonido. Un fenómeno interesante es el que se produce cuando se tocan dos instrumentos distintos en la misma nota. Ambos sonidos pueden tener la misma frecuencia, pero no necesariamente se percibirán igual; la diferencia radica en el timbre característico de cada instrumento..

Amplitud

La amplitud de una onda de sonido es el grado de movimiento de las moléculas de aire que la transportan. Dicho movimiento corresponde a la intensidad de expansión y compresión de la propia onda. Cuanto mayor es la amplitud de la onda, más intensamente golpea ésta a las moléculas del tímpano y más fuerte es el sonido percibido. La amplitud de una onda de sonido puede expresarse en unidades absolutas, mediante la medición de la distancia de desplazamiento de las moléculas del aire, la medición de la diferencia de presiones entre la compresión y la expansión, o la medición de la energía transportada. Para expresar la intensidad de los sonidos, éstos se comparan con un sonido patrón; en tal caso, la intensidad se expresa en decibeles (dB).

Intensidad

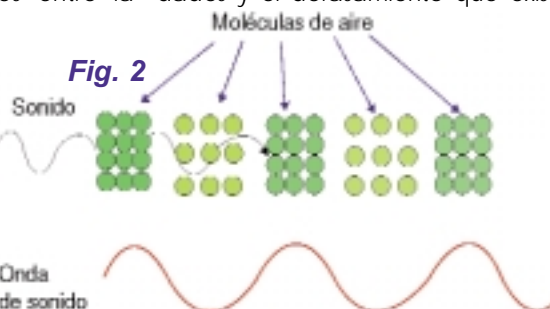
La distancia a la que se puede escuchar un sonido, depende de la intensidad de éste; la intensidad es el flujo promedio de energía que atraviesa cada unidad de área perpendicular a la dirección de propagación. En el caso de ondas esféricas que se propagan desde una fuente puntual, la intensidad medida en un punto es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia; esto, suponiendo que no se produzca ninguna pérdida de energía debido a la viscosidad, la conducción térmica u otros efectos de absorción.

En la propagación real del sonido en la atmósfera, los cambios físicos que el aire experimenta dan lugar a la amortiguación y dispersión de las ondas sonoras.

Timbre

Vamos a suponer que tenemos un violín, un piano y un diapason, y que con la misma intensidad se toca en los tres una nota **La** -situada sobre el **Do** central. Los sonidos resultantes serán idénticos en frecuencia y amplitud, pero muy diferentes en timbre. De las tres fuentes, el diapason es el que produce el tono más sencillo, conformado casi exclusivamente por vibraciones de tipo senoidal con frecuencias de 440 Hz.

Debido a las propiedades acústicas del oído y a las propiedades de resonancia de su membrana vibrante, es dudoso que un tono llegue en estado puro al mecanismo interno del oído. La componente principal de la nota producida por el piano o el violín también tiene una frecuencia de 440 Hz; sin embargo, ambas notas contienen a su vez componentes cuyas frecuencias son múltiplos exactos de 440 Hz: los llamadas **frecuencias armónicas**. Las intensidades y el defasamiento que exis-



Las Ondas Electromagnéticas

ten entre esas otras componentes, determinan el timbre de la nota.

VELOCIDAD DEL SONIDO

La frecuencia de una onda de sonido, es una medida del número de vibraciones por segundo de un punto determinado; a la distancia entre dos crestas (cimas) adyacentes de la onda, se le denomina **longitud de onda**. Al multiplicar el valor de la longitud de onda por el de la frecuencia, se obtiene la velocidad de propagación de la onda. Esta velocidad es igual para todos los sonidos sin importar su frecuencia, siempre y cuando se propaguen a través del mismo medio y a la misma temperatura. Por ejemplo, mientras la longitud de onda de la nota "La" situada sobre el "Do" central es de unos 78,20 cm, la de la nota "La" situada abajo del mismo es de 156,40 cm. En aire seco y a una temperatura de 0° C, la velocidad de propagación del sonido es de 331,6 m/s. Al aumentar la temperatura, aumenta la velocidad del sonido; por ejemplo, a 20° C la velocidad es de 344 m/s. Por lo general, el sonido viaja más rápido a través de líquidos y de sólidos que a través de gases. Tanto en los líquidos como en los sólidos, la densidad tiene el mismo efecto que en los gases.

REPRODUCCIÓN DEL SONIDO

Para la reproducción del sonido se emplean parlantes. Existen diferentes tipos, pero la mayoría de los actuales son dinámicos. Estos altavoces incluyen una bobina de ca-

ble muy ligero, sumergida dentro del campo magnético de un potente imán permanente o de un electroimán (figura 3).

Una corriente eléctrica variable, procedente de los circuitos electrónicos de algún amplificador, atraviesa la bobina y modifica la fuerza magnética entre ésta y el campo magnético del parlante. Al producirse cambios de corriente, la bobina vibra y entonces hace que un diafragma o un gran cono vibrante (unido mecánicamente a ella) se mueva para generar en el aire ondas sonoras; a su vez, este movimiento impulsa a las moléculas de aire en la forma del sonido que se desea reproducir.

Tipos de Parlantes

Para aumentar la potencia y la calidad del sonido, pueden utilizarse conjuntos especiales de parlantes de diferente tamaño: los pequeños son para notas agudas y los grandes son para notas graves.

La forma o diseño de los parlantes, es también factor que incide en la calidad del sonido que se reproduce. Existen básicamente tres tipos: circulares, cuadrados y elípticos (figura 4). Los primeros ofrecen una muy buena reproducción de sonido; los cuadrados, sólo una regular o buena reproducción; los elípticos son las mejores, pues permiten una

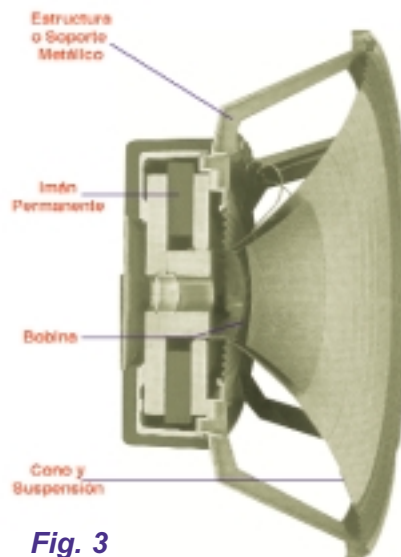


Fig. 3

excelente reproducción. La razón, es que el uso de los parlantes elípticos equivale a tener un parlante circular pequeño para tonos medios y otro circular grande para tonos bajos.

En todo sistema reproductor de audio, siempre será necesario instalar dos o más tipos de altavoces. La fidelidad del sonido mejora cuando para cada frecuencia y amplitud de la señal de audio se usa un tipo diferente de parlante; es decir, para tener un buen sistema de sonido se requieren reproductores de agudos (llamados *tweeters*), parlantes que reproduzcan los medios (*midrange*) y los graves (conocidos como *woofers*). Obviamente, el tema es amplio, por lo que lo analizaremos más adelante. *****

Fig. 4



El Mundo de la Electrónica

Es una publicación de Editorial Quark, compuesta de 24 fascículos de edición semanal, preparada por el Ing. Horacio D. Vallejo, contando con la colaboración de docentes y escritores destacados en el ámbito de la electrónica internacional. Los temas de este capítulo fueron escritos por Horacio Vallejo y Oscar Montoya Figueroa.