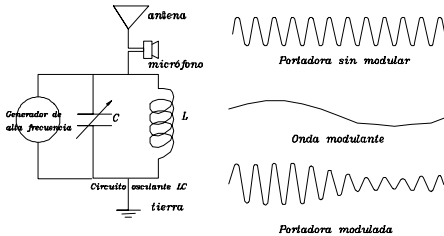


TRANSMISIÓN DE INFORMACIÓN POR ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

ESQUEMA SIMPLIFICADO DE UNA EMISORA DE AMPLITUD MODULADA



Introducción

Las ondas electromagnéticas, cuyo espectro visible es la luz, se emplean para transmitir información (palabra, música, imágenes, pulsos, etc.) Para que una onda electromagnética sea **portadora** de información es necesario que ésta se imprima de alguna forma sobre ella. Al proceso de impresión se le llama **modulación**. Así una portadora de 1000 Kilociclos por segundo (1MHz) puede llevar como mensaje una nota musical

audible de frecuencia mucho menor (por ejemplo el **la** normal con que se afinan los instrumentos, de 440 ciclos por segundo). ¿De qué manera puede "cargarse" el mensaje sobre la portadora? Básicamente hay dos métodos: el de modulación en amplitud y el de modulación en frecuencia.

Modulación en amplitud

Si sobre el circuito que produce una oscilación eléctrica de alta frecuencia dispongo un medio que influya en la amplitud de esa onda con frecuencia inferior, tendré una onda de alta frecuencia cuyas crestas dibujan por puntos la señal de influencia.

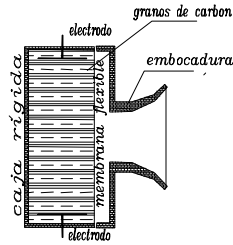
Como es lógico, la amplitud de la señal no puede ser mayor que la de la portadora pues sino las crestas quedarán reproducidas pero no así los valles, en los que la portadora sería nula.

La acción del micrófono es variar la resistencia del circuito de antena de acuerdo a los sonidos que influyen sobre él. Esta es la base de la modulación de una portadora "en amplitud".

Modulación en frecuencia

En cambio, en la modulación en frecuencia la señal no se incorpora en la amplitud de la portadora, sino que modifica la frecuencia del oscilador. Una manera directa de modular en frecuencia utilizando el circuito anterior podría consistir en hablar frente al condensador del circuito LC, de manera de variar su capacidad con las vibraciones sonoras. La frecuencia de resonancia del sistema LC quedaría así influida por la señal como se indica en la figura. La modulación en frecuencia permite una profundidad de modulación muy grande ya que la amplitud de la señal va incorporada a la frecuencia de la portadora que puede variar dentro de límites muy amplios.

ELEMENTO MICROFONICO DE CARBON



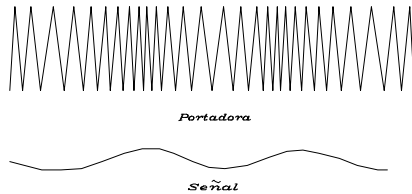
Elemento microfónico : una caja llena de

El "ancho de banda"

La modulación de una onda portadora con otra de menor frecuencia supone en general una combinación de ambas señales que puede realizarse de diversas maneras. En el Apéndice 1 se estudian matemáticamente la modulación en amplitud y en frecuencia, recién vistas, y además la modulación en fase y por mezcla de señales. Se demuestra que de todos esos métodos de modulación resultan siempre dos

ondas además de la portadora original: una de frecuencia suma y otra de frecuencia diferencia. Por ejemplo, al modular una portadora de 1000 Khz con un la normal de 440 Hz cantada frente al micrófono de la figura, se combinan ambas produciendo una onda de 1000440 Hz y otra de 999560 Hz además de la de 1000000 Hz . Las tres salen del transmisor gracias a que el circuito resonante es "un poco elástico" en cuanto a la producción de sus oscilaciones. Así, un circuito extremadamente rígido de **sintonía** muy aguda, que sólo resonara en una frecuencia de 1000 Khz única, no permitiría la modulación ni la transmisión de información alguna. La portadora modulada no es pues una onda pura sino que se compone de tres ondas: una central y otras dos a ambos lados. El intervalo de frecuencia ocupado por la onda modulada tiene un valor llamado "**ancho de banda de modulación**". Éste depende pues de la frecuencia de la señal transmitida. El receptor destinado a captar la transmisión debe poseer un **circuito resonante de sintonía** lo suficientemente amplio como para poder oscilar en el rango de frecuencias del ancho de banda.

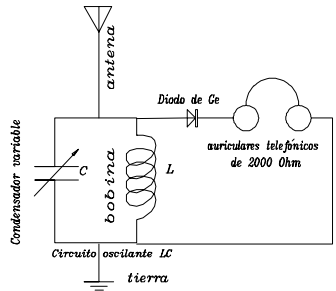
MODULACION EN FRECUENCIA



El ancho de banda y la asignación de frecuencias de emisoras

Se comprende que la frecuencia máxima de la transmisión condiciona el ancho de banda y limita la proximidad en frecuencia de otra emisora. Por eso la **Secretaría de Comunicaciones asigna** las frecuencias en donde deben trabajar las emisoras comerciales para que no interfieran unas con otras. En AM se admiten frecuencias de modulación de hasta 15 KHz para poder reproducir con fidelidad la música (para la palabra bastarían 5 KHz). Se requieren así anchos de banda de 30 KHz y los intervalos entre emisoras deben superar ese valor.

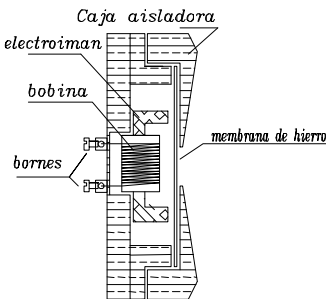
Por ejemplo Radio Municipal transmite en 710 KHz y hacia la derecha del dial viene luego Radio Mitre en 800 KHz : la diferencia entre ambas de 90 KHz es más que suficiente para que no se mezclen las emisiones.



ESQUEMA DE UN RECEPTOR ELEMENTAL DE AM

Detección de la señal

La separación de la señal de la portadora se conoce como **detección de la señal**. En la modulación en amplitud la señal afecta tanto los hemiciclos positivos como los negativos de la portadora, así que los medios de reproducción del sonido se verían solicitados por dos señales de sentido opuesto al mismo tiempo, con una resultante lógicamente nula. Por eso la detección de una onda modulada en amplitud requiere eliminar los hemiciclos de un signo (positivo o negativo) para que aparezca la señal dibujada por las **crestas** de la onda de alta frecuencia en un solo sentido.



ESQUEMA DE UN AURICULAR TELEFONICO

Para ello se emplea cualquier dispositivo que permita el paso de la corriente en un solo sentido sobre el reproductor de sonido (**teléfono** en el caso del dibujo). Hay varios dispositivos que dejan pasar la corriente en un sólo sentido: se llaman genéricamente **rectificadores**. Los más comunes son los diodos de estado sólido, que constan de un cristal de germanio o silicio puro unido a otro cristal del mismo elemento ligeramente impurificado. La inhomogeneidad de la unión favorece el pasaje de cargas positivas (huecos) del silicio puro al impurificado y electrones en sentido contrario (diodo PN)

En el caso de frecuencia modulada, se puede detectar la señal mediante un circuito ligeramente desintonizado con respecto a la portadora sin modular, que

reproducirá la misma con mayor o menor intensidad según que la frecuencia de la misma se acerque o aleje de la fundamental (la frecuencia fundamental es la que tiene la **portadora** sin modular)

El circuito oscilante en la transmisión y en la recepción

El transmisor y el receptor de radio tienen una parte común: el **circuito oscilante LC**, que consta de un **condensador** y una **bobina** conectados en paralelo. Supongamos inicialmente el condensador cargado que se descarga sobre la bobina. La corriente de descarga sigue un curso variable en el tiempo: primero es nula, luego crece hasta un máximo y luego disminuye. Pero sabemos que una bobina tiende a oponerse a la variación de corriente, y cuando la corriente tiende a disminuir, por efecto de esa inercia eléctrica que se llama autoinducción siguen pasando cargas aún después de que el condensador esté totalmente descargado. El resultado es que la placa negativa recibe más cargas de la que tenía inicialmente la placa positiva: la polaridad del condensador se invierte y cuando llega al máximo de carga, se descarga sobre la bobina esta vez consecuentemente con una corriente de sentido inverso a la anterior. Estos fenómenos se suceden a una **frecuencia** inversamente proporcional a los tamaños de la bobina y del condensador.

El tamaño de la bobina se evalúa eléctricamente por su coeficiente de autoinducción L que mide el flujo del campo magnético que abraza la bobina cuando la recorre una corriente unitaria. Éste se define matemáticamente como $L = \mu \cdot N^2 \cdot S / l$ ¹ (véanse los apuntes de electricidad), donde μ es la permeabilidad magnética del material del núcleo de la bobina de N vueltas, largo l (m) y sección s (m²). Para el aire o el vacío vale $\mu = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ H/m (en el sistema MKS).

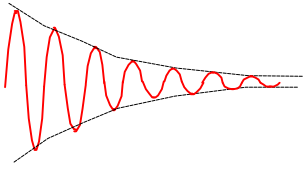
El condensador se representa por su capacidad, que para el caso de uno plano es $C = \epsilon \cdot S / d$, donde S es la superficie de sus placas en m² separadas por una distancia d (m) con un medio aislador de constante dieléctrica ϵ (para el aire o el vacío vale $\epsilon = 8.85 \cdot 10^{-12}$ (F/m)).

La resonancia eléctrica del **circuito LC** es análoga a la **resonancia** sonora de una cuerda de piano: comienza a vibrar si su frecuencia propia coincide con la frecuencia excitadora. Así como cuando cantamos una nota hacia el interior de un piano abierto queda resonando la cuerda que corresponde a dicha nota (esto debe realizarse con el pedal derecho apretado para liberar las cuerdas), de la misma forma el circuito LC se pone a vibrar en concordancia con la onda electromagnética que tiene su misma frecuencia cuando ésta lo alcanza.

La **frecuencia de resonancia** del sistema LC es $f = (1/2\pi) \cdot (1/(L \cdot C))^{1/2}$

¹ Fórmula válida para una bobina larga (véase el Apéndice 3 "Cálculo de circuitos resonantes", en la página 12)

Cada oscilación se produce con una amplitud menor que la anterior, ya que el sistema va perdiendo energía en forma de calor en la bobina. En efecto, la bobina está hecha con un conductor que posee resistencia eléctrica. Sabemos que se en ella se genera una potencia térmica igual al valor de su resistencia multiplicada por el cuadrado de la corriente que la atraviesa. Aunque no hubiera pérdida alguna en forma de calor (en el caso de una bobina superconductor perfecta), las oscilaciones se irían amortiguando porque el sistema **irradia** energía en forma de ondas electromagnéticas.



ONDA AMORTIGUADA

Este tipo de régimen de oscilaciones amortiguadas puede transformarse en otro de oscilaciones que mantengan su amplitud, reponiendo la energía perdida en forma de calor e irradiada (régimen de oscilación permanente)

En el caso de un transmisor, la energía de mantenimiento y radiación están provistas por un generador eléctrico de corriente alternada de frecuencia igual a la del circuito resonante. Dicho generador es modernamente a válvulas de vacío o transistores². Antiguamente, cuando no se conocían dispositivos electrónicos, se usaba un generador electromecánico rotativo esencialmente igual al de una usina de corriente alternada, sólo que de mucha mayor frecuencia que la domiciliaria.

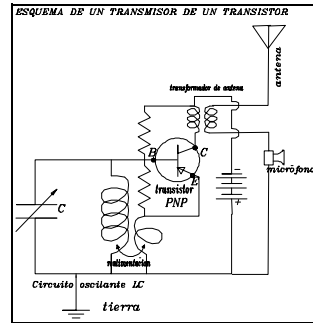
En el caso de un receptor, el sistema antena tierra capta la energía electromagnética de las estaciones próximas, y ésta hace resonar al circuito LC si su frecuencia coincide con la de la emisora.

Un transmisor de AM con un transistor

Si logramos reponer la energía perdida y la irradiada en un sistema LC, éste oscilará en forma permanente y mantendrá la emisión de ondas electromagnéticas a través del sistema antena-tierra. En la figura puede observarse un circuito de un transmisor con un elemento que el lector habrá oído nombrar frecuentemente: **un transistor**.

² A veces se emplea un cristal de cuarzo como "reloj" del oscilador: Un cristal que vibra mecánicamente produce entre sus caras una tensión eléctrica proporcional a la deformación que experimenta, efecto que se aprovecha para comandar relojes y osciladores.

EL **transistor** (del inglés transfer-resistor o sea resistor de transferencia) es un derivado del **diodo de estado sólido**: Consta de tres capas: en el tipo PNP hay una central de **silicio** o **germanio** impurificado con **arsénico**, que se llama cristal de base o simplemente "**base**". La base (en contacto con el terminal B) está entre dos capas de silicio o germanio puro que son desiguales: la más grande se llama **colector** (terminal C), y la más pequeña se llama **emisor** (terminal E). En realidad eléctricamente el transistor de tres capas está compuesto por dos diodos en oposición. No son de dimensiones iguales, por lo tanto el sistema no es simétrico y cuando conduce lo hace en un sólo sentido. Si la base no recibe ninguna corriente exterior, el dispositivo no es conductor, pero cuando se inyecta una pequeña cantidad de cargas en la base, el **transistor PNP** conduce de emisor a colector, siempre que haya una fuente que esté correctamente conectada como para sostener esa corriente. El transistor es pues una resistencia que disminuye con la intensidad de la señal que se inyecte en la base. En el circuito de la figura la base recibe una señal que proviene del circuito oscilante. El transistor la amplifica utilizando la energía de la fuente y en parte la devuelve al circuito oscilante a través de la realimentación inductiva entre las espiras señaladas en la figura. El resto de la energía pasa al sistema antena-tierra a través del transformador. El **micrófono** modula la amplitud de la oscilación irradiada al variar su resistencia por acción de las ondas sonoras que llegan a su membrana.



Se aclara que el transistor al que se ha hecho referencia es de **tipo PNP** o sea que las capas exteriores son de tipo P (positivo o elemento puro) y la capa interior (el jamón del sándwich) es de tipo N (impurificado negativo). Existen también los del **tipo NPN**, con el elemento puro en el medio. Los transistores tipo NPN son técnicamente más fáciles de fabricar, funcionan bajo el mismo principio pero conducen de colector a emisor y por lo tanto requieren que se invierta la polaridad de la fuente si reemplazaran al PNP en el circuito de la figura. El signo del transistor NPN tiene la flechita con la punta hacia el terminal E, marcando el sentido de la corriente.

Señales analógicas. Deformaciones y ruido

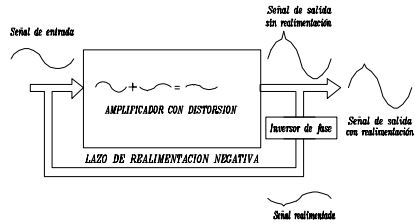
Hasta ahora se ha visto cómo una señal en forma de onda continua se superpone a la portadora. La señal continua de la que estamos hablando es una diferencia de potencial o una intensidad de corriente que puede tomar cualquier valor en un intervalo dado: está representada por un **número real**. Se la llama señal analógica porque sigue la variación de la señal original con análoga forma. Esta señal es una réplica de la onda sonora que incide por el micrófono, o mejor dicho,

se trata de que así lo sea. Desgraciadamente todo órgano que transforma y transmite una señal analógica le introduce deformaciones y ruido. La **membrana del micrófono** no es capaz de reproducir fielmente las variaciones de presión del aire transformándolas en movimientos proporcionales; por ejemplo será más sensible a las frecuencias que están más cerca de su punto de resonancia mecánica, reproduciendo pobremente los sonidos graves y los muy agudos: esto es **deformación de la señal**. Asimismo, los granos de carbón de la cápsula microfónica a veces se mueven y hacen mayor o menor contacto entre sí debido a reacomodamientos por aceleraciones, gravedad y dilatación térmica, que no responden a sonidos captados: **esto es ruido**. Los cables que transportan las corrientes de señal están muchas veces expuestos a campos electromagnéticos que como se sabe producen tensiones inducidas. Estas se adicionan a la señal: ésta contaminación con parásitos **también es ruido**. ¿Han visto que algunos receptores de transistores tienen un **soplido** continuo?: Es el ruido creado por la agitación térmica de los electrones en el cristal de silicio de sus transistores: se lo puede mitigar enfriando el sistema. Para obtener gran amplificación con bajo ruido en los sistemas de estado sólido hay que trabajar a **bajas temperaturas**.

Realimentación negativa

Para disminuir la deformación que introducen los elementos que amplifican y transmiten la información se usa la realimentación negativa, que consiste en extraer una parte de la señal de salida y reinyectarla a la entrada del sistema con **fase opuesta**, es decir de manera que tienda a oponerse a la señal de entrada. La resultante en un amplificador sin defectos es una entrada de menor amplitud, o sea sin ninguna ventaja. En cambio en un sistema con **distorsión**, que introdujera sobre la señal por ejemplo un pico hacia arriba, el efecto sería que este pico ya estaría presente a la entrada restando (hacia abajo), de manera de tender a compensar en parte el defecto que va a introducir el amplificador a continuación, en cierto modo previniéndolo.

AMPLIFICACION CON LAZO DE REALIMENTACION NEGATIVA



Realimentación positiva

¿Qué ocurriría si en el sistema anterior no existiera la inversión de fase? Con una realimentación moderada la señal reinyectada se sumaría a la de entrada y el sistema tendría mayor amplificación (y por supuesto mayor distorsión). Aumentando el grado de realimentación se llegaría a un proceso inestable, en el que el aumento de la señal produciría un aumento incontrolable de la salida. Pero todo sistema tiene un límite de potencia de salida: nada puede entregar una potencia indefinidamente creciente, así que llegado a cierto punto la salida comenzaría a crecer en menor medida y luego a estabilizarse en un límite. Se dice que el sistema ha llegado a la **saturación**.

Oscilación

Si lo que se reinyectara en un sistema de realimentación positiva no fuera directamente proporcional a la amplitud de la señal, pero sí a su variación (o **derivada**, matemáticamente hablando), el curso del fenómeno al llegar a la saturación no pararía allí sino que la variación en menos sería reinyectada en la entrada, produciendo a la salida una disminución aún mayor. El proceso seguirá deprimiéndose hasta el **corte de la señal** de salida. Este corte se realimenta como variación positiva y crea un aumento en la salida: Se explica así que un sistema realimentado positivamente con su señal derivada produzca oscilaciones. También se comprende como oscilará el circuito del transmisor que hemos visto antes, debido

al **acoplamiento inductivo** entre bobinas. Dicho acoplamiento a través de un verdadero transformador deja pasar solamente la **variación de la señal** de salida, ya que solamente la variación del campo magnético induce una diferencia de potencial en el secundario (que en realidad es la bobina del circuito oscilante).

Digitalización de la señal

El tratamiento de señales analógicas (transmisión y amplificación) supone necesariamente pérdida de información e incorporación de ruido.

Para poder usar una señal en una computadora, la misma debe constar de una sucesión de números enteros o de coma flotante, siempre con un número de dígitos limitado (digitalización). El proceso de digitalización comprende la medición por **muestreo de la señal** continua a intervalos regulares y con una frecuencia conveniente. La medición digital se realiza por **comparación** de la variable analógica (la diferencia de potencial entre dos cables que provienen de un pick-up con cápsula magnética o un circuito telefónico) con una serie de valores íntegros en escala a intervalos fijos: se toma como valor digital el íntegro que está más próximo al valor real. La sucesión de números se almacena en alguna memoria o se transmite como **sucesión de pulsos**. La información digitalizada en pulsos discretos es menos susceptible que la analógica de contaminarse con ruido en la transmisión: el ruido es esencialmente analógico y por lo tanto distinguible de la señal de pulsos. Pero en cambio se puede perder información en los siguientes casos:

- a) el proceso del **muestreo** de señal si no se toman la cantidad suficiente de valores de muestra³ y
- b) el proceso de digitalización propiamente dicho, que requiere **recortar** el número de decimales a un valor determinado.

-o-o-o-

³ Se demuestra que una señal continua queda recortada a una frecuencia igual a la mitad del número de pulsos de muestra por ciclo. Por ejemplo 20000 pulsos /segundo pueden contener la información de una onda senoidal de hasta 10000Hz

ELEMENTOS SOBRE TEORÍA DE LA INFORMACIÓN

Información existente y transmitida. Mensaje

La palabra información tiene como raíz latina "in-formare" que significa dar forma. La información reside así en la forma o aspecto de las cosas. En la forma de cualquier cosa hay una gran cantidad de información, que puede repetirse en otro ente o no. Por ejemplo un gota de agua de lluvia lleva información de la nube que le dió origen y de la atmósfera que atraviesa. Otra gota del mismo chaparrón lleva seguramente la misma cantidad de información, que será redundante u obvia si ya analizamos la primera. Resulta importante recordar que el presente análisis de la teoría de la información se aplica específicamente a la información transmitida, que no abarca a toda la información existente sino a la que es digna de ser conocida por lo novedosa en el punto de destino. Entonces la información que va a transmitirse es sinónimo de noticia o nueva, como la que contienen (o deberían contener) los diarios. Implica cambio o novedad y desde el punto de vista matemático tiene una **probabilidad de ocurrencia** relativamente baja .

Concepto probabilístico

Basado en este concepto probabilístico, se ha elaborado una teoría en la que la medida de la información decrece con la probabilidad de ocurrencia de un suceso. A probabilidad $P=1$ corresponde certeza y la información es nula, o mejor dicho, no hay noticia. A probabilidad extremadamente pequeña, la cantidad de información requerida para dar noticia es muy grande. Una fórmula que da resultados adecuados es:

$$\text{Cantidad de información necesaria } I = k \cdot \log (1/P)$$

La constante k dependerá de la unidad de información, por ejemplo el bit si se emplea un código binario (opción simple).

Ejemplo: Queremos transmitir la información necesaria para significar que *"El sol sale por el este"*. Podríamos desde luego dejar de transmitir algo tan obvio, pero admitiendo que algún lector o radioescucha quiera saber cuando tendrá luz natural para emprender un viaje por carretera, bastará con un escueto mensaje con la hora de salida del sol, y diríamos simplemente: "Hoy el sol saldrá a las 6:30 horas, sobre el río" (por si algún extranjero no ubica el este). En tres segundos transmitimos el mensaje, y a otra cosa. El asunto varía si queremos informar sobre algo insólito, por ejemplo que sobre Buenos Aires un tremendo espejo espacial reflejará esta noche la luz solar a las dos de la madrugada: este título requiere varios minutos de información o varias columnas en el diario: Se deberá decir la hora exacta y la duración del fenómeno, la intensidad de la luz y la exten-

sión de la mancha. ¿Producirá efectos sobre personas, animales y plantas?. ¿Hay antecedentes de algo parecido?. Y la lista de noticias para informar sobre algo tan novedoso sigue y sigue. Si al cabo de un mes el fenómeno se repite, la cantidad de información transmitida será mucho menor, y el buen periodista hará mención al episodio fresco del mes anterior, explayándose solamente en las diferencias que rodearán esta nueva prueba. En los diarios del año 2015 aparecerá solamente en la página meteorológica un pequeño planisferio donde se señalará la zona donde habrá luz reflejada en la fecha por los 400 espejos satelitales instalados; muchos saltarán esa página en busca de verdaderas noticias.

Enfoque técnico

Ahora estudiemos la cuestión desde un ángulo más técnico, preocupándonos menos del contenido conceptual del mensaje, y en cambio más de su extensión. La extensión del mensaje debe ser lógicamente proporcional a la cantidad de información que lleva. Veamos si la matemática nos lleva al mismo resultado, empleando la fórmula probabilística anterior: Generalmente los mensajes están compuestos por bits, bytes o letras y palabras, todos ellos elementos que tienen una probabilidad de aparecer que en general no es igual. Los espacios y las vocales aparecen mucho más frecuentemente que las x o las w en los textos comunes. Sin embargo, esto es una cuestión de idioma o lenguaje y en un mensaje proveniente de un muestreo de señal acústica como el que constituye una transmisión digital, podemos admitir que los dígitos que representan estas amplitudes tienen una probabilidad de aparición más o menos parecidas, entre dos límites: un mínimo y un máximo. Así, cada elemento de la información tiene una probabilidad igual que valdrá p (minúscula). La teoría de probabilidades enseña que la probabilidad de un suceso formado por n sucesos independientes es el producto de esas probabilidades independientes p . Esto equivale a poner que $P=p.p.p$ tantas veces como el número n , o sea que $P=p^n$

La cantidad de información que lleva un mensaje de n elementos resulta así $I=k.\log(1/p^n) = n.k.\log(1/p)$, o sea que la teoría de probabilidades también confirma que longitud y cantidad de información son proporcionales cuando se usa la fórmula del logaritmo de la inversa.

Velocidad, ruido, potencia y ancho de banda en la transmisión de información

En la transmisión de información son factores importantes la relación potencia de señal con potencia del ruido, y el ancho de banda necesario para una velocidad de transmisión dada. Se comprende intuitivamente que si la velocidad de transmisión aumenta crece proporcionalmente la frecuencia de la señal, y también aumentará necesariamente el ancho de banda del canal transmisor (véase lo dicho en la modulación de una portadora). Se cumple además que al pretender aumentar la velocidad de la transmisión, se requiere un canal cada vez menos ruidoso o una

TRANSMISIÓN POR ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

emisión cada vez más fuerte, así como para comunicarse rápida y eficazmente debemos hablar con un tono de voz que supere el ruido del ambiente en buena medida, o pedir silencio a los demás. Lo dicho se expresa matemáticamente por la fórmula de Shannon-Hartley:

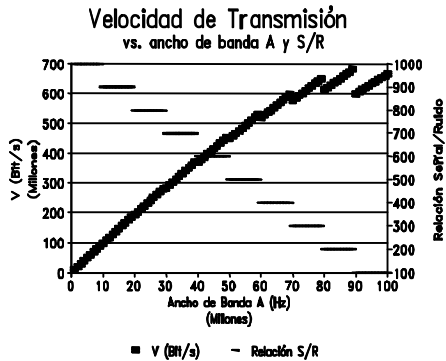
$$V=A.\log_2(1+S/R)$$

donde V es la velocidad de transmisión en bit/seg, A es el ancho de banda necesario (en Hz), S es la potencia de la señal y R es la potencia del ruido incorporado. Cuando la señal tiene la misma intensidad que el ruido (S=R)el logaritmo (de base 2) vale 1 y la velocidad de la transmisión es de 1 bit para un ancho de banda de 1 Hz (V=A)⁴

De lo anterior se deduce que se puede aumentar la velocidad de transmisión

- aumentando el ancho de banda.
- aumentando la potencia de transmisión.
- bajando el nivel de ruido.
- con cualquier combinación de estas acciones.

También se deduce que se puede mantener la velocidad de transmisión cambiando los valores de S/R en función de los de A. La consecuencia práctica de esto es que se puede optimizar al transmisión de datos en un canal disminuyendo la potencia de la transmisión en la medida que se cuente con un ancho de banda disponible adecuado.



Un ejemplo aplicado a una transmisión de televisión:

Se desea transmitir una señal de televisión a razón de 30 cuadros por segundo. Cada cuadro está compuesto por 640x480 píxel, con 16 colores posibles, como una pantalla VGA.

Una relación S/R conveniente es 1000 , que corresponde a una ganancia de $[10 \times \log_{10}(1000)] = 30$ dB

La velocidad de transmisión es: $V = 640 \times 480 \times 16 \times 30 = 148$ Mbit/s El ancho de banda necesario resulta:

$A = V / \log_2(1 + S/R) = 148 / 9.967 = 14.85$ MHz . (Se puede ubicar el punto en el gráfico

⁴ Por lo dicho en la nota de la página anterior y de acuerdo a la fórmula de Shannon-Hartley, con un ancho de banda A se pueden transmitir hasta 2A pulsos por segundo

adjunto).

¿A cuánto reduciríamos la potencia de la señal si contáramos con un canal un poco más ancho?

Si $A=20$ MHz resultaría que: $\log_2(1+S/R)=7.4$ y $S/R=168$ en vez de $S/R=1000$, es decir que se necesita sólo el 17 % de la potencia de transmisión anterior sin resignar calidad ni cantidad de información.

Información y entropía

Ya se vio que el concepto de entropía que se maneja en Termodinámica es la medida del desorden de un sistema, y también se vio que posee un significado microscópico al estar relacionado con la probabilidad de que un sistema de partículas posea una determinada configuración.. Esa probabilidad es máxima para la configuración de equilibrio, igual que la entropía. Si llamamos p a esa probabilidad, la entropía está dada por $S=k \cdot \log p$.

Yendo ahora a la teoría de la información, se ve que la cantidad de información de un mensaje tiene una fórmula que expresa un concepto opuesto a la entropía, por figurar en vez de la probabilidad, su inversa $1/P$: recordemos que $I=K \cdot \log(1/P)$. Las fórmulas comparables nos muestran una significación profunda: que la información de un mensaje conlleva orden, medido por la inversa de la probabilidad, y la desinformación es entropía y desorden, proporcional a esa probabilidad. La fórmula de Shannon-Hartley también muestra la relación entre velocidad de información y orden. En efecto, puede ponerse que $V=K \cdot \log\{(R+S)/R\}$, y así se ve que la velocidad de transmisión aumenta con la señal S , sinónimo de información ordenada, y disminuye por el ruido R , que es en definitiva equivalente a caos, desinformación y desorden.

APÉNDICE 1 – Matemática de la transmisión

Teoría de la modulación en amplitud

Sean $I_a \cdot \cos(\omega_a \cdot t)$ la expresión de oscilación de alta frecuencia (portadora) e $I_b \cdot \cos(\omega_b \cdot t)$ la de la señal de baja frecuencia. Modular en amplitud la portadora con la señal equivale a hacer variar la amplitud de la portadora de frecuencia ω_a de acuerdo a la fórmula $[I_a + I_b \cdot \cos(\omega_b \cdot t)]$ de manera que la oscilación modulada tiene la siguiente función con respecto al tiempo t:

$$f(t) = [I_a + I_b \cdot \cos(\omega_b \cdot t)] \cdot \cos(\omega_a \cdot t) = I_a \cdot \cos(\omega_a \cdot t) + I_b \cdot \cos(\omega_a \cdot t) \cdot \cos(\omega_b \cdot t)$$

Pero $\cos(\omega_a \cdot t) \cdot \cos(\omega_b \cdot t) = (1/2) \cdot \cos[(\omega_a - \omega_b)t] + (1/2) \cdot \cos[(\omega_a + \omega_b)t]$
y entonces: $f(t) = I_a \cdot \cos(\omega_a \cdot t) + (I_b/2) \cdot \cos[(\omega_a - \omega_b)t] + (I_b/2) \cdot \cos[(\omega_a + \omega_b)t]$

El primer término de la fórmula anterior representa la portadora sin modular, el segundo la oscilación de frecuencia diferencia $\omega_a - \omega_b$ y el tercero la oscilación de frecuencia suma $\omega_a + \omega_b$, tal como se explicó antes. La razón $\alpha = I_b/I_a$ se llama grado de modulación. En emisiones comerciales se trabaja con $\alpha = 0,7$
El ancho de banda es $(\omega_a + \omega_b) - (\omega_a - \omega_b) = 2 \cdot \omega_b$, como ya se dijo.

Mezcla de dos oscilaciones: pulsación o batimiento.

Un resultado parecido al anterior se produce cuando se suman o combinan aditivamente dos señales:

$$f(t) = I_a \cdot \sin(\omega_a \cdot t) + I_b \cdot \sin(\omega_b \cdot t) = I_a \cdot [\sin(\omega_a \cdot t) + \sin(\omega_b \cdot t)] + (I_b - I_a) \cdot \sin(\omega_b \cdot t) = 2 \cdot I_a \cdot \sin[(\omega_a + \omega_b)t/2] \cdot \cos[(\omega_a - \omega_b)t/2] + (I_b - I_a) \cdot \sin(\omega_b \cdot t)$$

Si las amplitudes son iguales $I_a - I_b = 0$ y el resultado puede entenderse como una portadora $2 \cdot I_a \cdot \cos[(\omega_a - \omega_b)t/2]$ de frecuencia $(\omega_a + \omega_b)/2$ modulada en amplitud con una señal de frecuencia $(\omega_a - \omega_b)/2$. Si la diferencia $\omega_a - \omega_b$ es pequeña, el fenómeno de refuerzo y debilitamiento de baja frecuencia $\omega = (\omega_a - \omega_b)/2$ se conoce con el nombre de pulsación o batimiento⁵

⁵ En los receptores superheterodinos se mezcla la portadora modulada de frecuencia ω_p con una oscilación local de frecuencia superior ω_l de manera que $\omega_l - \omega_p = \omega_i$ sea constante (frecuencia intermedia). La oscilación de ω_i se amplifica en varias etapas de sintonía fija hasta su detección. Se evita así la amplificación de sintonía variable con circuitos sintonizados en tándem.

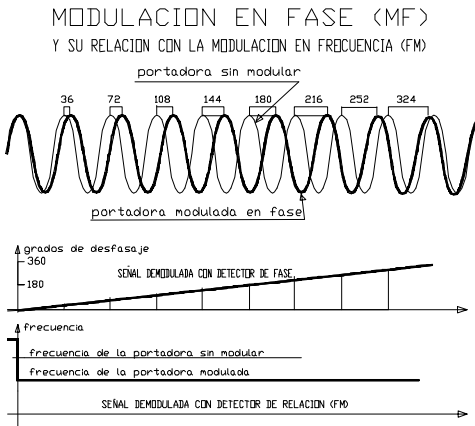
Teoría de la modulación en frecuencia

En este caso la frecuencia de la portadora , que sin modular tiene un valor de Ω , fluctúa con el tiempo t a otra frecuencia ω inferior.

Así queda: $f(t)=I \cdot \text{sen}[\Omega \cdot t+(q/\omega) \cdot \text{sen}(\omega t)]$

Si consideramos que q/ω (grado de modulación) es poco variable y pequeño, se puede entender la fórmula como la de una modulación en amplitud, con las consabidas oscilaciones de frecuencias $\Omega-\omega$ y $\Omega+\omega$

El tratamiento matemático (desarrollo en serie) para q/ω mayores que 0,3 revela la existencia de un número infinito de oscilaciones laterales de frecuencias múltiplos de ω , de amplitud decreciente con el orden de multiplicidad.



Modulación en fase

Se puede modular una oscilación $I=I_0 \cdot \text{sen}(\Omega t+\phi)$, haciendo que la fase ϕ sea variable con el tiempo $\phi=\phi_0+c \cdot \text{sen}(\omega t)$, donde Ω es la frecuencia de la portadora, ω es la frecuencia de la señal y c/ϕ_0 es el grado de modulación.

La modulación en fase MF y en frecuencia FM son en esencia la misma cosa: Se puede ver en la figura que el aumento constante del desfasaje de la portadora modulada

con respecto a la portadora sin modular produce una onda de frecuencia constante menor que la de ésta.

Este efecto se puede lograr de dos maneras:

1. modulando dicha portadora en fase con una señal S1 creciente, o bien
2. modulando en frecuencia con una señal S2 constante y negativa.

La relación necesaria entre dos señales que provoquen una misma onda modulada es que S2 tenga la forma de la derivada de S1, con signo cambiado, o lo que es equivalente que S1 sea proporcional a la integral de S2 a través del tiempo.

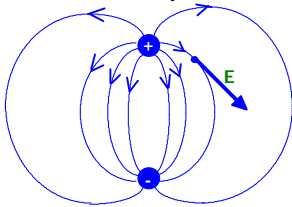
APÉNDICE 2- FUNDAMENTO DE LA TRANSMISIÓN POR ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Las **ondas electromagnéticas** que se producen en los transmisores de radio son de naturaleza análoga a la de la luz, sólo que de frecuencias mucho menores. Su existencia fue prevista teóricamente por Maxwell antes que fueran detectadas en el laboratorio por Hertz, a fines del siglo XIX

Son ondulaciones transversales, es decir que lo que oscila lo hace perpendicularmente a la dirección de propagación, como las olas en un lago. Esto se supo cuando se pudo individualizar el plano en que se efectuaba la vibración mediante experiencias de polarización. Pero...¿qué es lo que oscila? : Se creía antes en un medio que vibraba, transportando las ondas. Se lo llamó éter debido precisamente a su naturaleza etérea que no permitía detectarlo como algo material. Esa característica material del medio material necesario para propagar una perturbación se abandonó cuando se consolidó la teoría de los campos: cosas igualmente irreales pero un poco más manejables que el éter.

Campos gravitatorios, eléctricos y magnéticos

Actualmente se acepta que las acciones a distancia como las fuerzas de atracción eléctricas y magnéticas y también la gravedad, se materializan a través de campos vectoriales, verdaderas fuerzas en potencia que existen aunque no haya cargas o masas. La gravedad es un ejemplo de campo (gravitatorio) cuyo efecto (el peso de un cuerpo) aparece cuando hay algún material que lo acuse. Si en un punto coloco una pesa de 1 Kg , aparece sobre ella una fuerza de 1 Kg que la "tira" hacia abajo. Si retiro la pesa del lugar puedo considerar que allí hay ahora

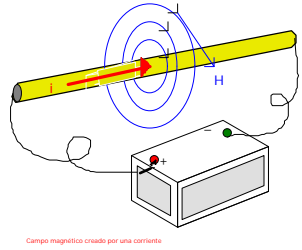


DIPOLO ELÉCTRICO

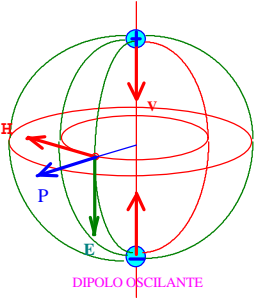
un campo de fuerzas gravitatorias al acecho de otro cuerpo que ocupe ese punto. Los campos gravitatorios se establecen alrededor de las masas. Si éstas son grandes como la de la tierra el efecto es notable (peso de los cuerpos). Si las masas son pequeñas el efecto es despreciable: la fuerza con que se atraen dos vagones de ferrocarril es apenas medible con la mejor de las balanzas de laboratorio.

Con la electricidad los efectos son más fuertes, pero del mismo tipo: un cuerpo cargado produce alrededor de él un campo eléctrico: algo que afecta las propiedades del espacio que lo rodea. Ese campo afecta a cualquier otro cuerpo cargado que esté en él, apareciendo sobre aquél una fuerza de atracción o de repulsión según su carga sea de distinto o igual signo que la del otro cuerpo.

Los campos magnéticos se crean alrededor de una corriente eléctrica adoptando una forma de torbellino, haciendo que aparezcan fuerzas sobre imanes y conductores con corriente. Campos eléctricos y magnéticos están relacionados: la variación de uno produce la aparición del otro: por eso existen ondas electromagnéticas, como resultado de la realimentación entre ambos fenómenos. Lo que oscila y se desplaza como una onda a la velocidad de la luz es una perturbación doble de campos eléctrico y magnético.



Campo magnético creado por una corriente

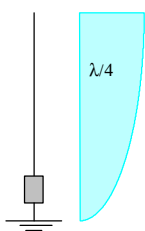


DIPOLO OSCILANTE

Antenas de transmisión

Cualquier conductor por el que circula una corriente variable irradia ondas electromagnéticas. Una antena es un conductor de dimensiones relacionadas con la longitud de onda que se quiere transmitir. Se coloca en lo alto de una torre o mástil para que su influencia se extienda, como la de un faro, lo más lejos posible. Veamos el efecto de un conductor vertical que se conecta en el extremo de la bobina del circuito oscilante de un transmisor:

Funciona como un dipolo oscilante: las cargas generan un campo eléctrico y la corriente genera un campo magnético. Cuando el extremo de la bobina va aumentando de potencial, comunica a la parte inferior de la antena ese potencial; la parte superior lo recibe al cabo de un tiempo a través de una onda de campo eléctrico, que se desplaza con la velocidad de la luz adentro (y también afuera) de la antena. En consecuencia se produce una corriente que asciende por la antena. Esta corriente variable produce un campo magnético variable alrededor de la antena. Los fenómenos se invierten cuando el extremo de la bobina va reduciendo su potencial después de haber llegado a un máximo: la corriente en la antena decrece, se hace nula y comienza a crecer en sentido contrario. Si la antena vertical tiene un largo tal que cuando la onda de campo eléctrico que la recorre es máxima en su parte superior resulta nula en su parte inferior, ese largo es la cuarta parte de la longitud de onda transmitida, como se ve en la figura.



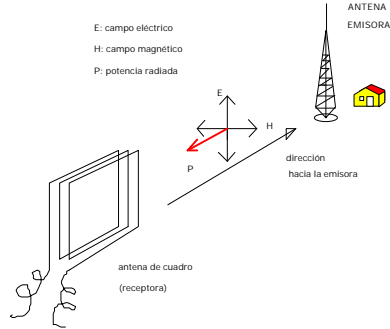
Oscilación propia de una antena vertical

En tales condiciones el comportamiento eléctrico de la antena es igual al comportamiento mecánico de una varilla vertical empotrada en su parte inferior: se excita (o entra en resonancia) con una vibración de longitud de onda igual a cuatro veces su longitud: es una antena sintonizada a esa frecuencia, que refuerza las oscilaciones del transmisor.⁶

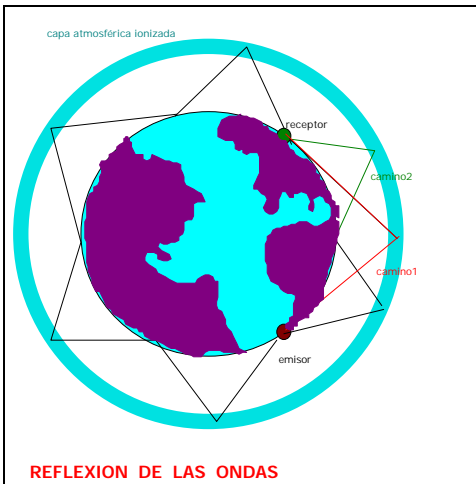
⁶ La relación entre frecuencia f , longitud de onda L y velocidad c está dada por $L=c/f$. Como

Antenas de recepción

Están destinadas a captar el campo electromagnético irradiado. Aunque una antena de transmisión es capaz también de recibirlo, tiene su máxima eficacia en la frecuencia de resonancia y rinde poco a otras frecuencias. En la recepción de equipos que deban operar en una banda de frecuencias amplia se prefieren antenas no sintonizadas, que aunque tienen menor ganancia ésta es más pareja en todas las frecuencias. En la transmisión cuesta mucho amplificar una señal potente como la que se usa para irradiar, por lo que el rendimiento de la antena debe ser elevado, en cambio en el caso de la recepción la señal captada generalmente débil puede amplificarse sin inconvenientes así que el rendimiento de la antena es menos importante. Un conductor sobre el que influyen campos eléctricos y magnéticos variables presenta una diferencia de potencial o voltaje también variable entre sus extremos: una antena de recepción es en definitiva un generador eléctrico de rendimiento bajo. Puede estar constituida también por una bobina o cuadro de grandes dimensiones, entre cuyos extremos se extrae la señal: las bobinas de cuadro son direccionales, es decir que presentan máxima captación para una orientación determinada. La orientación de máxima ganancia es apuntando con el cuadro a la antena emisora, como se indica en la figura. Los receptores de radiodifusión emplean como antena la propia bobina del circuito LC, que está arrollada sobre un núcleo de ferrita. En este material, derivado del óxido magnético de hierro, el campo H tiene una facilidad de paso (permeabilidad magnética) varios miles de veces más que en el aire, lo que canaliza su paso por la bobina. También las antenas de ferrita son direccionales.



$c=300000000$ m/s resulta que para ondas cortas de 2 metros la frecuencia vale $300000000/2=150000000$ Hz o sea 150 MHz. Asimismo para ondas largas de 600 m resulta $f=500$ KHz

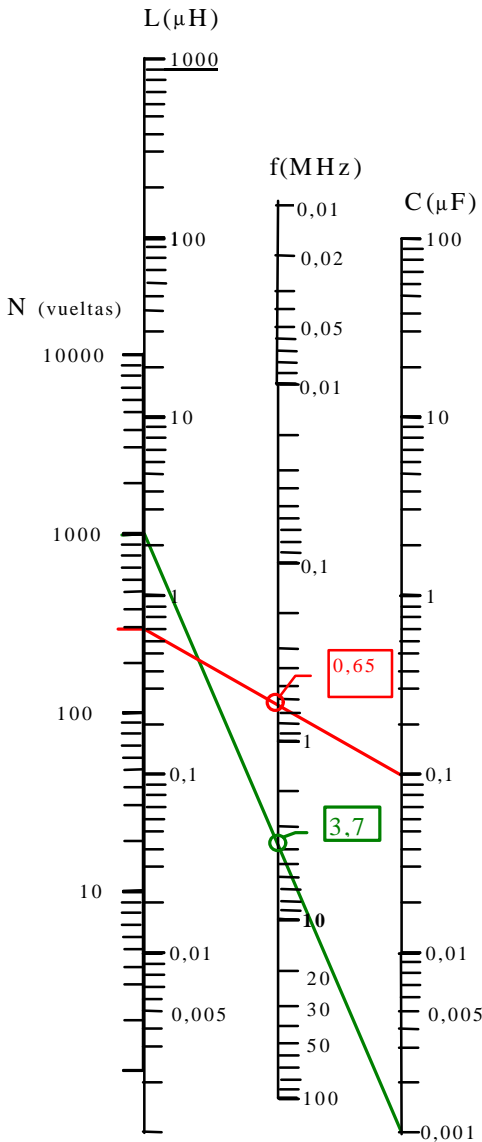


PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS EN LA ATMÓSFERA - FADING:

Las ondas electromagnéticas de comunicaciones se reflejan y refractan como la luz, pero al tener longitudes de onda mucho mayores que ésta, solamente los objetos de dimensiones comparables a la de esas longitudes de onda resultan ser obstáculos a su paso. Los materiales conductores de la electricidad transmiten mal las ondas y en cambio las reflejan o rechazan. Por el contrario los aislantes y el vacío las transmiten perfectamente, y se refractan o desvían cuando

pasan de un medio aislante a otro (por ejemplo del aire al vidrio, igual que la luz). La superficie terrestre es conductora y por lo tanto refleja a las ondas. También las altas capas de la atmósfera (100 a 400 Km de altura) tienen partículas cargadas y se comportan como conductoras para las ondas de radio, que se reflejan en ellas y vuelven a la tierra. Gracias a lo anterior se pueden captar transmisiones que rodean el globo al irse reflejando sucesivamente en él y en la atmósfera. Se ve en el dibujo que el la onda de la emisora puede llegar al receptor por más de un camino: puede ser que la misma señal llegue por lados distintos y se refuerce cuando la diferencia de caminos sea tal que las ondas se sumen (interferencia constructiva de ondas que llegan con la misma fase). También puede ser que la diferencia de longitud entre dos caminos distintos sea de un número impar de semilongitudes de onda, y entonces las amplitudes se restan porque llegan en fase opuesta. La situación generalmente va cambiando con el tiempo debido a la agitación de las capas atmosféricas (olas) y se presenta así el fenómeno del "fading" (desvanecimiento) o sea la fluctuación del volumen de recepción entre un máximo y un mínimo.

APÉNDICE 3 - Nomograma para el cálculo de circuitos resonantes



$L(H) = \mu \cdot s(m^2) \cdot N^2 / l(m)$ (solenoido largo)
 $(\mu = 1/4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m})$
 $C(F) = \epsilon \cdot (F/m) \cdot S(m^2) / d(m)$ (capacitor plano)
 $(\epsilon = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m})$
 $f(Hz) = 1 / (2\pi) \cdot \sqrt{LC}$

El nomograma está calculado para una bobina de N vueltas de alambre de 1 mm² de sección (1,13 mm de diámetro) con lo cual el largo de la hélice es $l = 0,00113 \times N$. Está arrollado en un cilindro de 1 cm de radio (cuya sección vale $s = 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$), y así resulta:

$L(\mu H) = 1/4 \cdot \pi \times 10^{-1} \times 3,14 \times 10^{-4} / 0,00113 \times N = 2,2 \times 10^{-3} \times N$

Ésta es la fórmula para un solenoido largo (l mayor que 10 veces su diámetro, o sea $l \geq 0,2m$), en el que se cumple la relación $N \cdot i = H \cdot l$, así que vale con aproximación adecuada para $N \geq 180$ vueltas. Para solenoides cortos $N \cdot i > H \cdot l$ y la fórmula da un valor por exceso.

En el gráfico está marcado en rojo el caso de una bobina de 300 vueltas, que posee 0,7 μH, y que con un capacitor de 0,1 μF resuena a una frecuencia de 0,65 MHz

En verde está marcado el caso de una bobina de 1000 vueltas en paralelo con un capacitor de

0,001 μ F. El conjunto resuena a 3,7MHz

Veamos qué dicen los cálculos analíticos:

$$L=2,2 \times 10^{-3} \times 300=0,66 \mu\text{H}$$

$$f=1/2/\pi/(0,66 \times 0,1 \times 10^{-12})^{1/2}=0,62 \times 10^6 \text{ Hz}$$

Los resultados del nomograma en este primer ejemplo dan un error del orden del 5%.

$$L=2,2 \times 10^{-3} \times 1000=2,2 \text{ mH}$$

$$f=1/2/\pi/(2,2 \times 0,001 \times 10^{-12})^{1/2}=3,4 \times 10^6 \text{ Hz}$$

Los resultados del nomograma en este segundo ejemplo dan un error mayor, del orden del 10%, debido en parte a que la recta de unión corta con mayor sesgo a las escalas.

ÍNDICE

TRANSMISIÓN DE INFORMACIÓN POR ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS	79
Introducción	79
Modulación en amplitud	79
Modulación en frecuencia	80
El "ancho de banda"	80
El ancho de banda y la asignación de frecuencias de emisoras	81
Detección de la señal	81
El circuito oscilante en la transmisión y en la recepción	82
Un transmisor de AM con un transistor	83
Señales analógicas. Deformaciones y ruido	84
Realimentación negativa	86
Realimentación positiva	86
Oscilación	86
Digitalización de la señal	87
ELEMENTOS SOBRE TEORÍA DE LA INFORMACIÓN	88
Información existente y transmitida. Mensaje	88
Concepto probabilístico	88

	2
Enfoque técnico	89
Velocidad, ruido, potencia y ancho de banda en la transmisión de información	89
Un ejemplo aplicado a una transmisión de televisión:	90
Información y entropía	91
APÉNDICE 1 – MATEMÁTICA DE LA TRANSMISIÓN	92
Teoría de la modulación en amplitud	92
Mezcla de dos oscilaciones: pulsación o batimiento.	92
Teoría de la modulación en frecuencia	93
Modulación en fase	93
APÉNDICE 2- FUNDAMENTO DE LA TRANSMISIÓN POR ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS	94
Campos gravitatorios, eléctricos y magnéticos	94
Antenas de transmisión	95
Antenas de recepción	96
PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS EN LA ATMÓSFERA - FADING:	97
APÉNDICE 3 - NOMOGRAMA PARA EL CÁLCULO DE CIRCUITOS RESONANTES	98
ÍNDICE	A

