

Ing. Enrique Grünbaum D.

Transmisión de microondas con modulación de pulsos

Introducción a las microondas.—En el último decenio se ha desarrollado enormemente la transmisión de informaciones mediante ondas electromagnéticas de longitudes comprendidas entre un metro y décimos de milímetro. Este espectro de ondas, que se designa con el nombre de microondas, ocupa un pequeño rango dentro del vasto dominio de las ondas electromagnéticas, al cual pertenecen las ondas de radio, las infrarrojas, las visibles (la luz), las ultravioletas, los rayos X y los rayos gamma. Todas ellas son esencialmente lo mismo: la propagación de campos electromagnéticos en el espacio, y se diferencian fundamentalmente en el valor de su longitud de onda o frecuencia. Los fenómenos que se observan con ellas son similares, pero dependen de las dimensiones de los obstáculos en comparación con la longitud de onda y del medio material a través del cual se propagan, ya que las propiedades de éste (por ej.: el índice de refracción y el poder de absorción) dependen de la longitud de onda. La forma de generar y de recibir las ondas electromagnéticas es diferente para las distintas longitudes de onda.

Para ubicar exactamente el espectro de las microondas debe mencionarse que las ondas largas y cortas de uso cotidiano en la broadcasting y radiotelefonía comprenden las ondas desde unos 1.000 metros hasta 10 metros de longitud. Las ondas comprendidas entre 10 metros y un metro se utilizan para las transmisiones con modulación de frecuencia y de televisión. A continuación viene el espectro de las microondas, que deslinda por su otro extremo con el de las ondas infrarrojas (o radiaciones calóricas), cuyas longitudes están comprendidas entre algunos décimos de milímetro y diezmilésimos de milímetro, y que son producidas mediante radiadores térmicos (por la agitación térmica de las moléculas). Son las microondas las ondas más cortas que es posible generar mediante tubos electrónicos u otros osciladores microscópicos. Es interesante hacer notar que ha sido posible producir ondas electromagnéticas de la misma longitud de onda, tanto mediante osciladores macroscópicos como con radiadores térmicos, y no queda actualmente ninguna laguna en el dominio de las ondas electromagnéticas.

Para la generación, transmisión y recepción de microondas es necesario emplear una técnica distinta en varios aspectos fundamentales de la que se usa

para las demás ondas de radio. Así, se tienen tubos osciladores de diseño muy diferente (por ej.: tubos lighthouse) o basados en principios totalmente nuevos (klystrones y magnetrones). Los circuitos resonantes ya no están formados por bobinas y condensadores, sino por sistemas en que las inductancias y capacidades están distribuidas en el espacio, o sea, líneas paralelas y coaxiales de una determinada longitud y resonadores metálicos huecos (cavidades resonantes). Las líneas de transmisión son, con el objeto de evitar las pérdidas por radiación, líneas coaxiales o simples tubos rectangulares o redondos huecos (guías de ondas), semejantes a los tubos acústicos que sirven para impartir órdenes desde el puente de comando de un buque.

Desde el punto de vista de la teoría, ya no es posible el empleo de los conceptos y ecuaciones de los circuitos eléctricos, sino que es necesario recurrir a las nociones y expresiones más fundamentales de la teoría electromagnética de Maxwell.

Aplicaciones de las microondas.—Las aplicaciones más importantes de las microondas se encuentran actualmente en las transmisiones telefónicas, sustituyendo las líneas y cables telefónicos, y en la localización de objetos (radar). También se utilizan, aunque en pequeña escala, en la transmisión a distancia de medidas y comandos, y de señales para la protección de líneas eléctricas.

La necesidad del uso de las microondas para las transmisiones telefónicas proviene del hecho que la mayor parte de las frecuencias más bajas se encuentran ya ocupadas. Una enorme ventaja en el uso de las microondas es que los ruidos producidos por chispas u otros efectos en aparatos eléctricos y los ruidos atmosféricos no interfieren en las comunicaciones, ya que ellos son ondas electromagnéticas de frecuencias más bajas.

Además, en vista del enorme número de frecuencias de que se dispone en el campo de las microondas es posible usar nuevos tipos de modulación, la modulación de frecuencia, y, en especial, la modulación de pulsos, que necesitan para su transmisión una banda ancha de frecuencias (situada a ambos lados de la frecuencia de la onda portadora), especialmente la modulación de pulsos. Estos tipos de modulación reducen aún la influencia de los únicos ruidos presentes en el receptor, que son los de las ondas infrarrojas (radiaciones calóricas) que se reciban, como asimismo los debidos a la agitación térmica de los electrones en las resistencias y tubos de entrada del receptor. En la transmisión telefónica mediante microondas se obtiene una recepción de tan buena calidad como mediante cables o líneas telefónicas.

Sin embargo, las microondas no son reflejadas por la ionósfera, y como se propagan casi en línea recta, sólo pueden ser transmitidas a una distancia en que las antenas de transmisión y recepción sean visibles entre sí, o algo más allá, distancia que está limitada por la curvatura de la tierra. Esta dificultad se subsana instalando estaciones retransmisoras (estaciones relay). Además, se trata siempre de instalar las antenas a la mayor altura posible.

Existe evidente ventaja en el empleo de microondas en la comunicación entre el continente y una isla cercana en lugar de un cable submarino, y en terrenos montañosos o con otros obstáculos (por ej.. una ciudad), donde es difícil la instalación y mantención de alambres y cables telefónicos. Estas transmisiones se efectúan entre puntos determinados, utilizándose entonces antenas

direccionales constituídas, por ejemplo, por un conjunto de dipolos, por reflectores parabólicos o por bocinas en los extremos de guías de ondas (al igual que en los tubos acústicos). Esto tiene la ventaja que la energía se concentra en una dirección determinada y, aunque la potencia que se puede obtener con los tubos a estas frecuencias es relativamente reducida, la potencia recibida resulta más que suficiente. Al mismo tiempo, aunque dos estaciones cercanas usaran frecuencias parecidas, la posibilidad de interferencias se reduce mucho. Además, la comunicación resulta muy secreta. Precisamente es posible obtener para las microondas con antenas de dimensiones no excesivas altas concentraciones de energía en un haz de ondas muy agudo, ya que éstas dependen de la razón entre la dimensión de la antena y la longitud de onda.

Microondas se prestan muy bien a la transmisión de medidas y comandos a distancia y de señales para la protección de líneas eléctricas, ya que por la ausencia de ruidos atmosféricos o de aparatos eléctricos y la escasa posibilidad de interferencias de otras estaciones, por ser una transmisión dirigida y poderse elegir una frecuencia muy distinta de cualquier estación cercana, le dan a este tipo de comunicaciones toda la seguridad que requieren.

Como una de las aplicaciones más importantes de las microondas se tiene la localización de objetos (radar: **radio detection and ranging**). Para este servicio es necesario usar ondas tan cortas, ya que sólo para ellas es posible construir antenas de dimensiones no excesivas que permitan concentrarlas en un haz de ondas muy agudo y dirigirlas en una dirección determinada. La localización de los objetos se basa en que las ondas electromagnéticas son reflejadas desde los objetos buenos conductores o buenos dieléctricos, obteniéndose su posición por la dirección de la antena del transmisor y su distancia por el tiempo que las ondas emplean en ir y volver. También es posible medir la velocidad de los objetos en movimiento por el cambio de frecuencia que producen en la onda reflejada (efecto Doppler).

Desde el punto de vista de la física, el estudio de las microondas presenta el mayor interés, ya que teniendo las mismas propiedades de las ondas electromagnéticas más cortas, pueden realizarse con ellas todas las experiencias de la óptica, a veces, incluso en condiciones más favorables. Experiencias de esta índole ha sido posible realizar en el Instituto de Física de la Universidad de Chile. Ellas pueden ser de mucha utilidad en la enseñanza de la óptica. Para ellas se utiliza un pequeño transmisor con una antena de dipolo con un reflector parabólico para emitir un haz de ondas lo más paralelo posible. El receptor es un pequeño conjunto portátil consistente en un dipolo con un reflector plano o parabólico, una línea coaxial resonante, un cristal rectificador de silicón y un instrumento indicador.

Es posible, por ejemplo, verificar las leyes de la reflexión mediante una plancha de cobre actuando como espejo. Fenómenos de interferencia, o sea, disminución o aumento de la intensidad recibida debido al encuentro de dos ondas en fase diferente o igual, pueden ser observados haciendo que las ondas lleguen desde el transmisor al receptor por caminos de distinta longitud. Así, colocando en la cercanía de la línea imaginaria que une transmisor con receptor una plancha de cobre, las ondas que llegan directamente al receptor interfieren con aquellas que llegan después de ser reflejadas por la plancha y que siguen un camino más largo. La diferencia de caminos no es limitada, ya que las ondas son coherentes.

Colocando el transmisor detrás de dos ventanillas en una plancha metálica, ambas actúan como emisores de ondas en todas direcciones produciéndose interferencias de las ondas provenientes de ambas fuentes en el espacio delante de la plancha. Si se interceptan una parte de las ondas mediante una plancha metálica pueden observarse fenómenos de difracción. Mediante una serie de alambres dispuestos paralelamente se obtiene una red de difracción. Fenómenos de polarización resultan especialmente fáciles de estudiar, ya que las ondas emitidas son polarizadas linealmente con su vector eléctrico paralelo a la antena. Se recibirá una intensidad máxima en la antena receptora cuando es paralela a la del transmisor y nula cuando se gira en 90°. Interponiendo en el camino una rejilla de alambres paralelos puede observarse reflexión total cuando estén paralelos a la antena transmisora, y mínima cuando estén perpendiculares a ella.

Generación de microondas.—Precisamente las primeras ondas electromagnéticas de radio, producidas por Heinrich Hertz en 1887, que le permitieron confirmar la existencia de las ondas electromagnéticas predichas en la teoría electromagnética de Maxwell, eran de una longitud de unos 60 cm. Eran generadas mediante un oscilador de chispas y estaban constituídas por trenes de ondas amortiguadas.

Luego fué inventado el tubo electrónico, con el cual era posible producir ondas electromagnéticas no amortiguadas. Sin embargo, hubo serias dificultades al tratar de producir ondas tan cortas como son las microondas. Para aumentar la frecuencia de resonancia de un circuito resonante es necesario, de acuerdo con la fórmula fundamental

$$f = 2 \pi \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

disminuir su capacidad e inductancia. Se puede disminuir la capacidad e inductancia de los circuitos resonantes de un oscilador a valores muy pequeños, pero hay que considerar que forman parte de estos circuitos las conexiones de los electrodos del tubo oscilador, que tienen una cierta inductancia, y los electrodos mismos, que constituyen pequeños condensadores. La inductancia de las conexiones de los electrodos y la capacidad entre electrodos son valores dados para cada tubo. Precisamente, para los tubos usuales ellos son demasiado apreciables haciendo imposible producir oscilaciones de la frecuencia de las microondas aunque se disminuyan a un mínimo la inductancia y capacidad de los circuitos resonantes.

Además, aunque los electrones viajan a velocidades muy grandes dentro de los tubos electrónicos, el tiempo que necesitan para llegar del cátodo al ánodo en los tubos usuales es comparable al tiempo que dura un ciclo de oscilación cuando la frecuencia es muy alta. Por ejemplo, para una longitud de onda de 30 centímetros, o sea, una frecuencia de 1.000 megaciclos/segundo, cada ciclo sólo dura un milésimo de millonésimo de segundo. De este modo, los electrones que parten del cátodo cuando la placa es positiva pueden llegar a ella cuando ya esté negativa, reduciendo la eficiencia o haciendo imposibles las oscilaciones. El tiempo de tránsito de los electrones puede disminuirse reduciendo la distancia

entre electrodos y aumentando la tensión de placa (aumenta la velocidad de los electrones).

Por lo tanto, se ha modificado esencialmente el diseño de los tubos usuales de modo de reducir a un mínimo la inductancia y capacidad de los electrodos y la distancia entre ellos. Tubos muy conocidos que cumplen con estas condiciones son los tubos lighthouse (llamados así por su forma externa, parecida a un faro; se llaman también disk-seal, por tener electrodos planos, sellados directamente con el vidrio).

Pero, al mismo tiempo, se encontraron nuevos principios de generación de ondas electromagnéticas muy cortas totalmente distintos de los usados para las ondas más largas. Basados en estos principios se tienen los dos tipos más importantes actualmente: los tubos klystrones, o de velocidad modulada, y los magnetrones. Los circuitos resonantes, que forman la otra parte del oscilador, también tuvieron que sufrir una modificación esencial. Una línea de alambres paralelos, por ejemplo, de una determinada longitud, que constituye un circuito resonante, irradia, sin embargo, la mayor parte de su energía a frecuencias tan altas. Fué necesario, pues, tener circuitos resonantes en que toda la energía estuviera encerrada. Cumplen con esta condición las cavidades resonantes, que son cajas metálicas huecas de forma y dimensiones determinadas por la frecuencia a que deben resonar. Estas cajas son similares a las cajas resonantes acústicas por ejemplo, la de un violín, lo que se explica por ser la longitud de las ondas sonoras, que varía entre 20 metros y 2 centímetros, del mismo orden de magnitud de las microondas.

Modulación de pulsos.—La modulación, es decir, la transmisión de señales o de la voz mediante ondas electromagnéticas, se realiza variando alguna de las características de la onda de modo que su valor en cada instante sea una función de la intensidad de la señal o de la voz en ese instante. Las características de la onda son su amplitud, su frecuencia y su fase (Fig. 1). Estas sirven de base a los tipos de modulación que llevan estos mismos nombres.

La modulación de amplitud es la más usual en las transmisiones de broadcasting y radiotelefonía. La modulación de frecuencia se está usando también en escala creciente, en las transmisiones de broadcasting, en transmisiones a corta distancia, en especial en equipos móviles (en vehículos), y en forma exclusiva para la transmisión de la voz y música que acompaña a la televisión, por la excelente calidad de la recepción que con ella se obtiene.

En la transmisión de microondas se usa aún otro método de modulación: la modulación de pulsos. Para explicarla debe mencionarse que existen dos métodos fundamentales para emitir las ondas:

1. En forma continua (Fig. 1).
2. A pulsos, es decir, se emiten trenes de ondas que duran brevísimos tiempos y que se repiten a intervalos regulares (Fig. 2).

Esta forma de emisión es la tan conocida en el morse. También es la más usada en el radar ya que, si se emitieran las ondas en forma continua, no se sabría distinguir entre las emitidas y las reflejadas por el obstáculo.

Para la transmisión de la voz o de señales puede usarse también con ventaja la emisión a pulsos, aprovechando alguna de las características de los pulsos (figura 2), de modo que el valor de ella sea en cada instante una función de la in-

tensidad de la señal o de la voz en ese instante. Así pueden distinguirse los siguientes métodos de modulación de pulsos:

1. De la amplitud de los pulsos.
2. De la duración de cada pulso.
3. De la posición del pulso en el tiempo respecto de un pulso patrón (modulación de tiempo o de posición).
4. De la frecuencia de los pulsos.
5. En código (se suprimen o dejan algunos de los pulsos de un conjunto de pulsos transmitidos cada vez).

Estos métodos se prestan también muy bien para la transmisión simultánea de muchas conversaciones usando un solo transmisor.

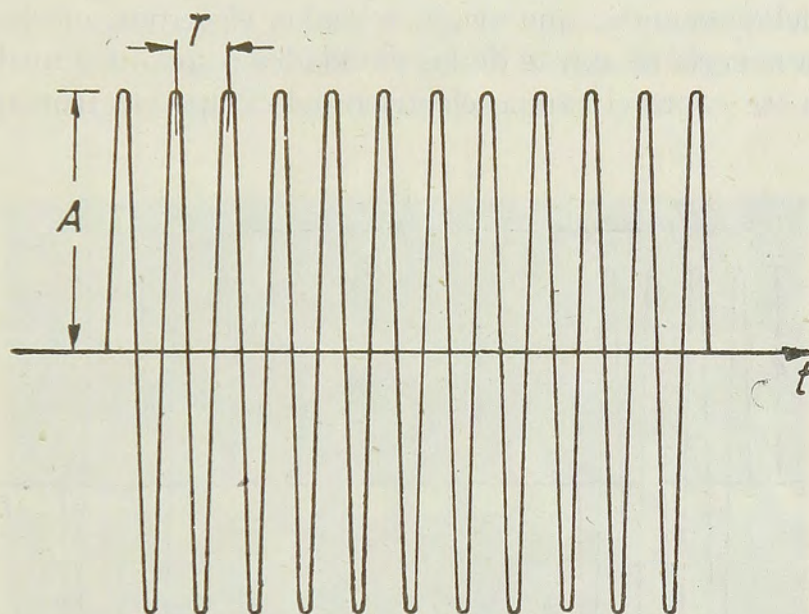


Fig. 1: Emisión continua. Características:

A = Amplitud

T = período

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

$$\lambda = \frac{c}{f} = \text{longitud de onda}$$

Valores típicos que dan una idea del orden de magnitud de las características de los pulsos, son los siguientes:

Duración del pulso: $1 \mu s$; ella corresponde, para una longitud de onda de 10 cm. o sea, una frecuencia de 3.000 megaciclos por segundo, a trenes de 3.000 oscilaciones cada uno.

Frecuencia de los pulsos: 1.000 ciclos/segundo, para radar; 10.000 ciclos/segundo para telefonía.

La modulación de pulsos, al igual que la modulación de frecuencia, tiene la ventaja de reducir la influencia de los ruidos, ya que ellos influyen mucho menos sobre el comienzo o término de los pulsos, que es lo que interesa en los distintos tipos de modulación de los pulsos (salvo en la de amplitud de los pulsos), que sobre la amplitud de las oscilaciones que es la que interviene en la modulación de amplitud.

La modulación de pulsos para la transmisión de voz, sin embargo, sólo puede ser usada para las microondas, ya que los pulsos ocupan una banda de frecuencias de varios megaciclos, como se comprueba expresando los pulsos por una serie de Fourier, es decir, una suma de armónicas, que en vista de la escasez de frecuencias disponibles en el campo de las ondas largas, cortas y muy cortas, es inadmisibles.

Transmisor experimental de microondas con modulación de la frecuencia de los pulsos.—Este trabajo fué realizado en el Laboratorio de Electrónica de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Chile. El oscilador utilizado se compone de un tubo lighthouse 2C43 y cavidades resonantes del tipo reentrante. El oscilador produce oscilaciones de frecuencia ajustable entre 2.300 y 2.700 megaciclos/segundo, que originan ondas electromagnéticas de 13 a 11 centímetros. La energía se extrae de las cavidades resonantes mediante una probeta capacitiva (se capta el campo eléctrico del campo electromagnético de alta

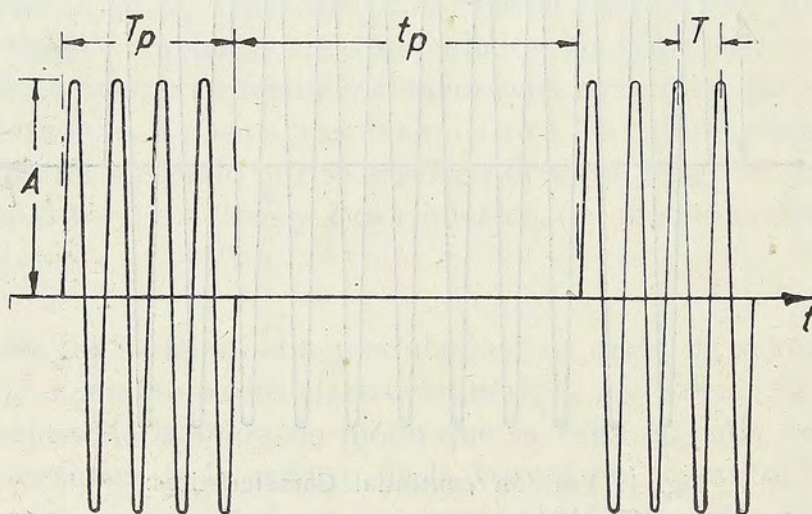


Fig. 2. Emisión a pulsos. Características:
Las mismas de fig. 1 más las siguientes:

$$\begin{aligned}
 T_p &= \text{duración del pulso} \\
 t_p &= \text{intervalo de tiempo entre pulsos} \\
 f_p &= \frac{1}{t_p + T_p} \approx \frac{1}{t_p} = \text{frecuencia de los pulsos} \quad (T_p \ll t_p)
 \end{aligned}$$

frecuencia contenido en las cavidades), y se lleva por una corta línea coaxial hacia la antena, constituida por un dipolo de 6 cm de longitud y de un reflector parabólico.

El tubo y las cavidades están diseñados para oscilar a pulsos. Para obtener las oscilaciones a pulsos pueden señalarse varios métodos. El método empleado aquí consiste en aplicar la alta tensión (1.500 a 2.000 V) permanentemente a la placa del tubo del oscilador y mantener normalmente muy negativa su grilla, de modo que no conduzca corriente. (La tensión negativa necesaria en la grilla es producida por las mismas oscilaciones, no siendo necesario tener una fuente de tensión negativa.) Pulsos de tensión positivos respecto del cátodo, generados en un generador separado, se aplican a la grilla haciéndola positiva; el tubo conduce

y se producen oscilaciones. Después de una serie de oscilaciones, en virtud de la tensión negativa inducida por las mismas oscilaciones en el circuito de grilla, ésta se hace tan negativa que impide la conducción del tubo y las oscilaciones cesan. La duración de cada serie de oscilaciones (pulso) es independiente, en este método, de la duración de los pulsos de tensión positivos aplicados a la grilla, que sólo sirven para iniciar cada serie de oscilaciones, y depende de la resistencia y capacidad del circuito de grilla del oscilador. Es del orden de los microsegundos.

Como generador de los pulsos de tensión necesarios para iniciar cada serie de oscilaciones se eligió un oscilador de grilla bloqueada. Este permite efectuar en forma sencillísima la modulación de la frecuencia de los pulsos de tensión generados por él y, por lo tanto, la de los pulsos de oscilaciones de alta frecuencia. En vista de que se trata de transmitir una sola conversación simultáneamente, la modulación de frecuencia de los pulsos resulta muy conveniente. La frecuencia de los pulsos de tensión del oscilador de grilla bloqueada se varía mediante una tensión que se conecta en serie con la resistencia de grilla de este oscilador, que

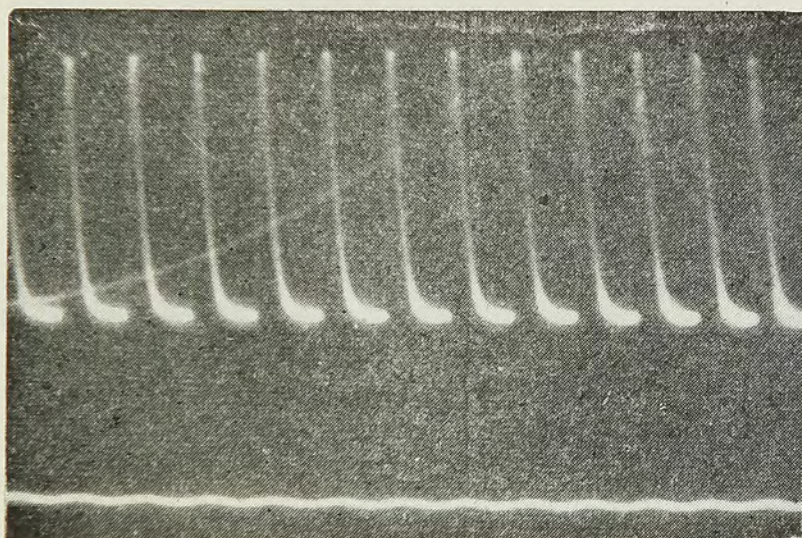


Fig. 3. arriba: Pulsos que controlan el oscilador de alta frecuencia no modulados. Frecuencia de los pulsos: 10 000 c/s. Abajo: Tensión de modulación: nula.

modifica la velocidad con que se descarga el condensador de grilla a través de la resistencia de grilla. Por lo tanto, aplicando la tensión proveniente del micrófono, y debidamente amplificada, a la grilla del oscilador de grilla bloqueada, **se obtienen pulsos cuya frecuencia en cada instante es una función del valor en ese instante de la tensión de modulación.** Este proceso de modulación se representa utilizando una tensión de modulación sinusoidal (un sonido puro) para facilitar las explicaciones, en los oscilogramas de figuras 3, 4, 5 y 6.

En la figura 3 se representan los pulsos cuando no se aplica ninguna tensión de modulación.

En la figura 4 una tensión de modulación (abajo) hace variar la frecuencia de los pulsos (arriba) **de acuerdo con su valor instantáneo.** Analizando un ciclo de la tensión de modulación se observa que, a medida que se hace más positiva, la frecuencia aumenta (el tiempo entre pulsos disminuye), siendo un máximo para la cresta positiva; en seguida disminuye (el tiempo entre pulsos aumenta), y es igual a la frecuencia de los pulsos sin modulación (representados en

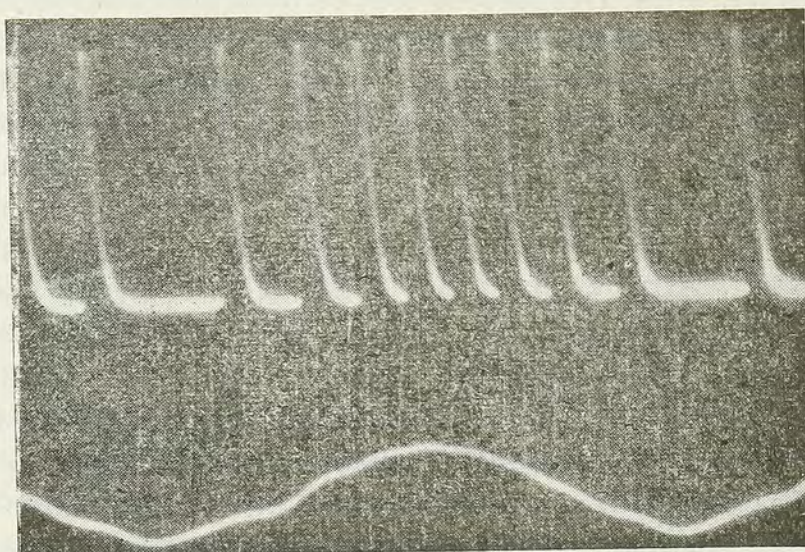


Fig. 4, *arriba*: Pulsos de fig. 3, modulados en frecuencia, *abajo*: Tensión de modulación. Frecuencia: 1 250 c/s. Se observará que la frecuencia varía de acuerdo con el valor instantáneo de la tensión de modulación.

la Fig. 3), cuando la tensión de modulación pasa por cero. Llega a un mínimo para la cresta negativa de la tensión de modulación.

En la figura 5 se ha aumentado la frecuencia de la tensión de modulación, lo que tiene como consecuencia que el ciclo completo de la variación de la frecuencia de los pulsos, o sea, el aumento paulatino de la frecuencia hasta su valor máximo y la consiguiente disminución paulatina hasta su valor mínimo, se hace en un tiempo más corto. Los valores máximo y mínimo de la frecuencia de los pulsos son los mismos de la figura 4 ya que ellos dependen únicamente de la amplitud de la tensión de modulación.

En la figura 6 la tensión de modulación tiene la misma frecuencia de la figura 4, pero ha disminuído su amplitud. Se observa que un ciclo completo de variación de la frecuencia de los pulsos demora el mismo tiempo; pero el valor máximo de la frecuencia de los pulsos, que se produce para la cresta positiva de

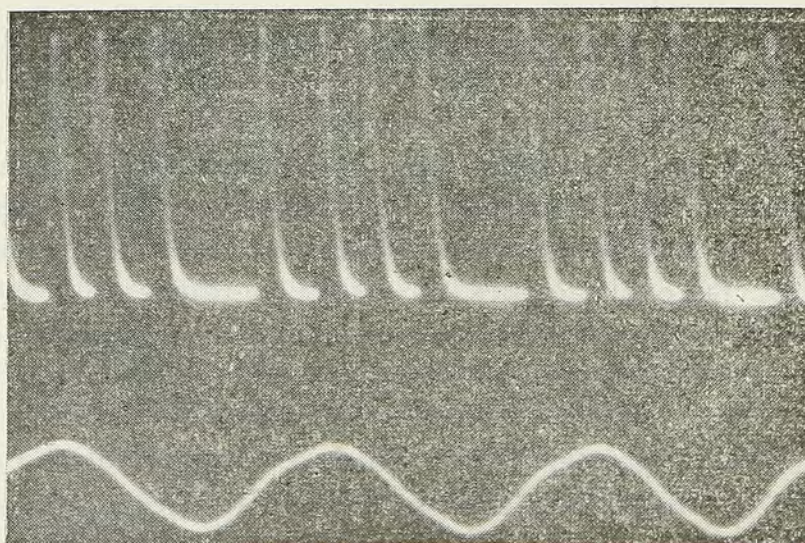


Fig. 5, *arriba*: Pulsos de fig. 3 modulados en frecuencia, *abajo*: Tensión de modulación. Frecuencia: 2 500 c/s.

la tensión de modulación, es menor, y el valor mínimo, que se produce para la cresta negativa, es mayor, o sea, la diferencia entre las frecuencias máxima y mínima y la correspondiente a modulación nula es menor.

Se observa entonces en todas las figuras que la frecuencia de los pulsos en cada instante es una función del valor en ese instante de la tensión de modulación. No importa cuál sea la función, siempre que en la desmodulación en el receptor se use la misma. En este caso, ella es aproximadamente el inverso de un logaritmo, ya que la frecuencia es igual al inverso del tiempo entre pulsos y éste está determinado por la velocidad de descarga de un condensador a través de una resistencia en serie con la cual está conectada la tensión de modulación.

Comparando las figuras 4 y 5 se nota que a medida que aumenta la frecuencia de la tensión de modulación el número de pulsos correspondientes a cada ciclo de ella es menor 8 y 4 respectivamente, o sea, el valor instantáneo de la tensión

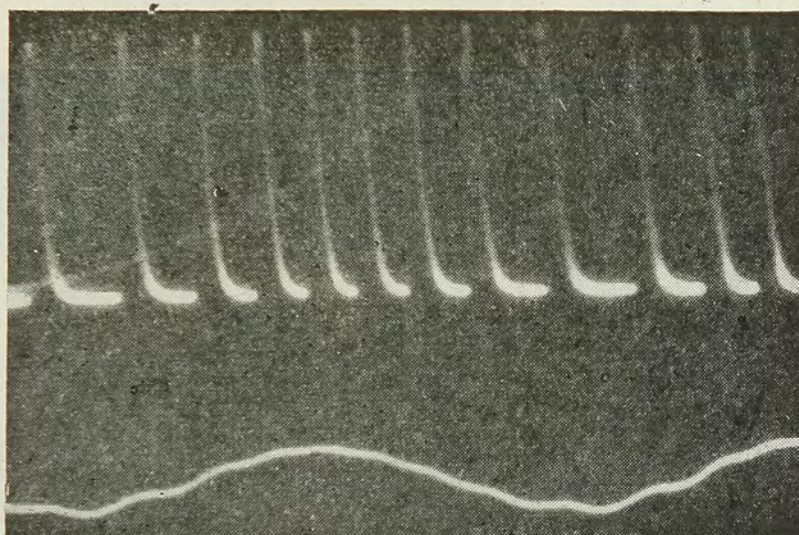


Fig. 6, arriba: Pulsos de fig. 3 modulados en frecuencia, abajo: Tensión de modulación menor que en fig. 4, pero de igual frecuencia. Se observará que el tiempo entre pulso y pulso para la cresta negativa es relativamente menor que en fig. 4 y relativamente mayor para la cresta positiva.

de modulación se analiza menos seguido. Existe un valor mínimo aceptable del número de pulsos por segundo, es decir, de la frecuencia de los pulsos, que se calcula considerando el número de pulsos mínimo necesarios para analizar cada ciclo de la tensión de modulación de la frecuencia más alta que se desea transmitir, de modo que la tensión de modulación pueda ser reconstituída debidamente en la desmodulación.

Los pulsos de tensión así modulados en frecuencia y debidamente amplificados controlan el oscilador de alta frecuencia, que produce oscilaciones de amplitud constante durante cada pulso.

Los pulsos de ondas electromagnéticas que se reciben se detectan directamente con un rectificador de cristal de silicón. A la salida de él se obtienen pulsos de tensión, que se amplifican en seguida. Para obtener mayor sensibilidad en la recepción, es decir, mayor razón entre señal recibida y ruido, podrá usarse un oscilador local de oscilación continua (de construcción similar al oscilador emplea-

do) que produzca una frecuencia algo distinta de la del transmisor, mezclándose ambas y obteniéndose una frecuencia más baja mediante la acción rectificadora de un cristal de silicón. La detección directa permite recibir potencias de pulso hasta de 10^{-8} watt.

Para desmodular los pulsos se utiliza un circuito formado por un triodo, un condensador, en paralelo con la placa y cátodo de triodo, y una resistencia en serie con la placa que tengan la misma constante de tiempo ($\tau = R \cdot C$) que el circuito de grilla del oscilador de grilla bloqueada, que genera los pulsos. El condensador se carga a través de la resistencia bajo una tensión constante. El pulso de tensión obtenido en el detector y amplificado se aplica a la grilla del triodo que normalmente se mantiene negativa, y que entonces conduce y descarga instantáneamente el condensador. Si el tiempo entre un pulso y el siguiente se reduce, el triodo conduce antes y el condensador sólo alcanza a cargarse a una tensión relativamente menor. Lo contrario sucede si el tiempo entre un pulso

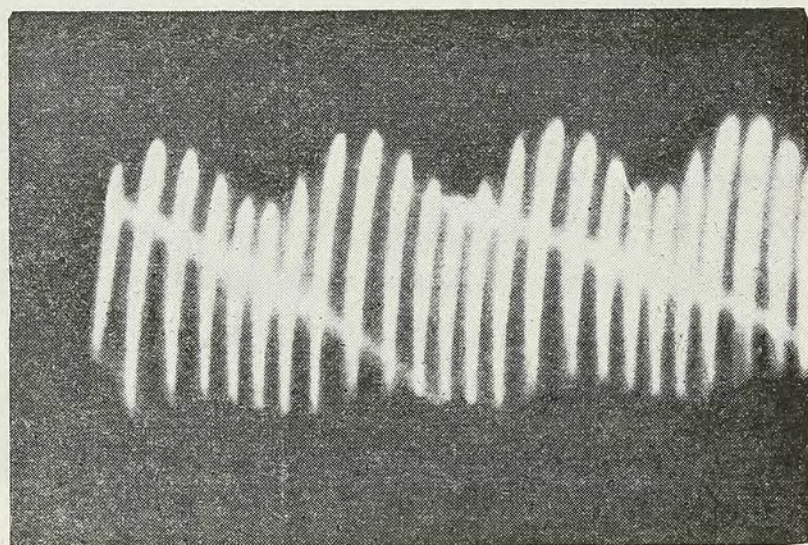


Fig. 7. Pulsos desmodulados en el receptor. Las variaciones de frecuencia se traducen en variaciones de amplitud.

y el siguiente aumenta. De este modo se obtienen pulsos cuya amplitud es mayor o menor según si la frecuencia de los pulsos es, respectivamente, menor o mayor. Esta variación de la amplitud es exactamente igual a la tensión de modulación, ya que las constantes de tiempo en los circuitos de modulación y desmodulación son iguales y, por lo tanto, las funciones que relacionan la frecuencia de los pulsos con la tensión de modulación y con la amplitud en la desmodulación, respectivamente, son iguales.

El proceso de desmodulación se representa en la figura 7. En ella puede apreciarse también la carga lenta del condensador, representada por las líneas gruesas, y la consiguiente descarga instantánea, representada por líneas verticales muy finas.

Los pulsos que se obtienen en el proceso de desmodulación, modulados en amplitud y frecuencia, se amplifican en un amplificador de potencia. Por medio de un filtro se suprimen los pulsos y se obtiene la envolvente de ellos, que es igual a la tensión de modulación. Esta se aplica al parlante.