

ANALES

DEL INSTITUTO DE INGENIEROS DE CHILE

Calle San Martín N.º 352 - Casilla 487 - Teléf. 88841 - Santiago - Chile

Año LIII (1) *A* Octubre-Noviembre de 1940 *A* N.º 10-11

(1) Año LIII desde la fecha de su primera publicación en 1888 como «Anales del Instituto de Ingenieros». Año XL desde la fecha de su primera publicación, Enero de 1901, como «Anales del Instituto de Ingenieros de Chile».

Ing. electricista, J. Hinrichsen

Las ondas decimétricas

GENERALIDADES

En el presente artículo se hace un estudio de las ondas menores de un metro, su importancia para las comunicaciones radio-eléctricas actuales y futuras y en forma especial se analizan los distintos métodos de generación para estas frecuencias ultraelevadas.

La ciencia radioeléctrica se ocupa cada vez más de las ondas ultracortas. Existe un afán para avanzar más y más en el campo de las ondas siempre menores. De las ondas cortas hemos pasado al campo de aquellas que llamamos ultracortas, de aquí pasó la investigación a las ondas menores de un metro, más aun sabemos de las microondas, las del orden de muy pocos centímetros y aun milímetros. ¿Por qué se dirige la investigación actual en esta dirección tan bien determinada? Tratemos de examinar detenidamente el campo de estas frecuencias tan elevadas para poder dar la contestación a esta pregunta.

Las primeras aplicaciones de la técnica de las altas frecuencias cayeron en el campo de las comunicaciones eléctricas, se agregaron más tarde: la navegación radio-eléctrica, la terapia radiofrecuente, etc. Las aplicaciones que surgirán en el futuro, una vez dominadas completamente las bandas inferiores, son difíciles de predecir completamente, algunas ya se vislumbran claramente.

A pesar de haber sido hechas las primeras experiencias en ondas electromagnéticas en la banda de las ondas ultracortas, muy pronto fueron abandonadas éstas, se tendió decididamente a las ondas de longitud lo mayor posible. Determinante para ello fué la conclusión alcanzada teóricamente de que el alcance aumentaba con el largo de onda, que efectivamente obtuvo su comprobación en ondas largas y fué causa de la construcción de emisoras de ondas muy largas. Repentinamente, como es del dominio general, se descubrió que en contraposición de esta teoría la propagación en ondas menores de 100 metros resultaba mucho mejor. Los alcances obtenidos en esta gama fueron enormes sobre todo tomando en cuenta las potencias extraordinariamente pequeñas que fueron empleadas. Así fué como se comprobó la existencia de la

capa de Kenelly-Heaviside, predicha decenas de años antes por estos investigadores, y se llegó a la utilización intensiva de esta banda de frecuencia. Llegóse así al límite de aproximadamente 15 metros, en donde las condiciones de propagación variaban nuevamente, se había alcanzado la gama de las ondas cuasi ópticas, las ondas electromagnéticas comenzaban a comportarse a partir de allí en forma semejante a la luz. Los alcances seguros no sobrepasaban el horizonte visual desde la emisora, no habiendo, eso sí, influencia por parte de la neblina, lluvia, etc. Este alcance limitado, considerado en un comienzo como desventaja, llegó a valorarse más tarde como ventaja positiva. En el transcurso de este desarrollo se había hecho el descubrimiento de la posibilidad de construir fácilmente antenas direccionales de dimensiones razonables para ondas de esas gamas, antenas prácticamente imposibles de construir para ondas largas y medianas ya que sus dimensiones deben ser siempre múltiplos del largo de onda. Se agrega todavía el hecho importantísimo que consiste en el ensanche de la banda de frecuencia en las gamas de ondas cortas. Para formarnos una idea exacta sobre este punto sirva el siguiente razonamiento (1): Para telegrafía rápida se necesita un ancho de banda de 125 ciclos/seg., para telefonía comercial: 2750 ciclos/seg. y para una imagen de televisión aceptable: 2,5 megaciclos/seg. Si se transmite en ambas bandas laterales y se considera una separación mínima entre canales, podemos considerar para la telegrafía: 400 ciclos/seg., para la telefonía: 8000 ciclos y 6 megaciclos/seg. para la televisión. De aquí se desprende la siguiente distribución de canales:

Entre los 20000 y 100 metros de onda estarían a disposición:

7462 canales de telegrafía

373 canales de telefonía

0 canales de televisión.

Entre los 100 y 8 metros de onda:

86250 canales de telegrafía

4312 canales de telefonía

5 canales de televisión.

Entre los 8 y 0,5 metros de onda:

1406250 canales de telegrafía

70312 canales de telefonía

93 canales de televisión.

Entre los 0,5 y 0,1 metros de onda:

6000000 canales de telegrafía

300000 canales de telefonía

400 canales de televisión.

En otras palabras: el espectro de frecuencia entre los 100 metros y 10 centímetros es aproximadamente mil veces mayor que aquel entre los 100 y 10000 metros de onda. Las posibilidades que nacen de este hecho son enormes. Piénsese sólo un momento en que dentro de los límites abarcados por el horizonte podrían coexistir sin molestias mutuas 300000 emisoras de telefonía y todo eso en la gama de 0,5 a 0,1 metros solamente. (Tengamos bien presente, eso sí, que a estas longitudes de ondas se le presentan con caracteres bastantes graves los problemas de la estabilización de frecuencia

(1) Referencia a la Bibliografía que se publicará en el próximo número, al final de la última parte de este trabajo.

de los transmisores cuya solución previa será una condición esencial para la realización de la posibilidad enumerada. Sobre este particular volveremos más adelante). Siguiendo, el razonamiento veremos que igual número de emisoras podría funcionar a su vez en lugares más allá del horizonte visual alcanzado por el grupo anterior. Más aún: aprovechando la facilidad de construcción de sistemas irradiantes direccionales para estas longitudes de ondas se desprende que el número de emisoras posibles de instalar aumenta todavía más al utilizar las propiedades direccionales para separar las estaciones. Vemos, pues, que un sistema de radiocomunicaciones en estas ondas tendría un carácter completamente distinto a los actuales a base de ondas «largas».

Los sistemas irradiantes direccionales podrán tener, pues, dimensiones reducidas en ondas decimétricas, con ello todo el equipo adquiere un tamaño menor. Esta reducción en el tamaño geométrico marcha paralela con la reducción de la potencia eléctrica necesaria: un haz de 30 grados, tanto en el lado transmisor como receptor, significa una concentración de la potencia de 24 veces en cada lado (aproximadamente) por lo tanto un mejoramiento de las condiciones de la comunicación en 24 por 24 veces = aproximadamente 600 veces. Aunque en la práctica no es posible conseguir estos valores, véase más adelante, se notará sin embargo que una comunicación en esta gama es posible efectuarla con una gran economía de potencia (2). La afirmación antedicha queda un tanto disminuída por el hecho de ser muy grande la atenuación en ondas ultracortas. Por otra parte, lo que contrarresta en cierto modo lo anterior, aumenta el rendimiento de las antenas que puede llegar a ser cerca de 100% en ondas muy cortas.

El uso de antenas direccionales para emisoras de longitud de onda entre 15 y 50 metros tendrá por fin la transmisión dirigida más allá del horizonte. Las dimensiones de las antenas y reflectores en esta gama siempre serán tan considerables que no podrán usarse estos elementos en equipos móviles. Debajo de los 10 metros de onda servirán los equipos exclusivamente para alcances no más allá del horizonte. Una antena dirigida de 9 metros, por ejemplo, (como las usadas en los equipos Lorenz para aterrizaje de aviones) tiene aun dimensiones demasiado exageradas como para permitir su uso en equipos móviles. Estos hechos, y la necesidad de construir equipos de dimensiones manuales para comunicaciones a pequeña distancia, condujo al traslado repentino de las investigaciones en el campo de las ondas menores de un metro. Ya en esta gama es posible construir sistemas irradiantes direccionales de dimensiones no mayores que un reflector luminoso, y con un haz reducido es posible disminuir la potencia necesaria a un extremo tal que a fin de cuentas resulte una instalación pequeña y muy manuable.

Se ve, pues, que las ondas decimétricas tendrán una aplicación futura de preponderancia en las comunicaciones cercanas. Sin embargo, su aplicación para comunicaciones de larga distancia no queda excluída. Supóngase por ejemplo, una serie de equipos relays, receptor y transmisor completo, situados a distancias convenientes entre sí. No vendría sino a constituir un «cable» a transmisión por portadora en que el «cable» mismo desaparece y sólo quedan los repetidores. Demás está recalcar la importancia de un sistema de comunicación de esta clase, tómese en cuenta tan sólo su adaptabilidad para televisión.

(2) Referencia a la Bibliografía que se publicará en el próximo número, al final de la última parte de este trabajo.

El hecho de poder usar haces de ondas decimétricas a modo de reflectores luminosos permitirá substituir a estos últimos en una serie de casos en que por causas de poca visibilidad no resulten eficaces. Sean, por ejemplo, las luces de posición de un barco, como se sabe todos los barcos llevan una luz roja y otra verde, una de cada lado, que en caso de neblina o en general en tiempo de poca visibilidad no pueden ser vistas por los otros buques. Cada una de estas luces podría ser substituída por un emisor de ondas decimétricas, sus transmisiones no llegarían más allá del horizonte y la neblina no afectaría su proplación.

Para análogos casos, como se hace ya en el aterrizaje a ciegas de aviones, podrían usarse sistemas de antenas y reflectores para la formación de rayos guías indicadores del trayecto correcto para en la entrada de los buques a la bahía, o para la navegación en canales, etc. (3).

Cuanto más corta sea la onda tanto más se asemeja en su comportamiento a la luz, se presentan así refracciones y reflexiones. Estas propiedades permitirán, evidentemente, otra nueva aplicación: la posibilidad de localizar obstáculos, objetos, etc., mediante la proyección de un haz de rayos de ondas decimétricas sobre los mismos y comprobando la recepción de rayos reflejados. Tendríamos así la «visión eléctrica».

Las consideraciones anteriores habrán servido sin duda para formarse una idea de la importancia de las ondas decimétricas y del gran campo que les estará reservado. A continuación se trata el problema general de la generación de estas frecuencias tan elevadas, y las modalidades especiales que presenta.

EL OSCILADOR A REACCIÓN PARA ONDAS DECIMÉTRICAS

En este capítulo haremos un análisis detallado de los diversos métodos seguidos en la generación de ondas decimétricas, a saber: el oscilador a reacción, el de Barkhausen-Kurz y el tubo magnetrón. Comenzaremos, pues, por el estudio del oscilador a reacción aplicado a la generación de esta clase de ondas, para lo cual pasaremos por alto la teoría general de este oscilador para concretarnos exclusivamente a las particularidades que ofrece en esta gama de frecuencias determinada.

Examinaremos primeramente las condiciones que ha de cumplir un triodo a reacción para poder servir como generador de ondas decimétricas. Para disminuir cada vez más la onda de un triodo oscilador a reacción debemos proceder antes que nada a la disminución del circuito oscilante externo, procedimiento realizable hasta el límite en que la capacidad externa todavía es superior a la capacidad interna de la válvula. Este caso ya no se verifica en ondas decimétricas: aquí es la capacidad interna del triodo la que forma la capacidad del circuito oscilante. De este hecho nace la primera exigencia: capacidades internas de la válvula reducidas al máximo, condición que trae consigo la necesidad de dimensionar los electrodos con las medidas menores posibles. Por otra parte, estos mismos electrodos deben ser capaces de disipar las potencias perdidas, para lo cual es necesario darles dimensiones grandes. Estos hechos nos permiten reconocer una imposibilidad, o sea, que en ondas muy cortas no se pueden obtener grandes potencias útiles.

(3) Referencia a la Bibliografía que se publicará en el próximo número, al final de la última parte de este trabajo.

Las condiciones de adaptación del triodo a su circuito externo, que con ondas cada vez menores se empeoran constantemente, ponen un límite a la onda más corta posible de obtener, y motivan un rendimiento extraordinariamente bajo de la generación de ondas por debajo de un límite determinado. Así lo demostrará el raciocinio que indicamos a continuación. Para el mantenimiento de las oscilaciones en un generador a reacción es necesario un factor de reacción de:

$$K = D \cdot (1 + \dot{R}_i / R_a)$$

en donde D (llamado por algunos factor de absorción de la válvula) es el valor recíproco del factor de amplificación del triodo, R_i es la resistencia interna y R_a la resistencia externa. La resistencia del circuito oscilante es: $R_a = L / C_r R$, en donde R es la resistencia de pérdidas total o sea la resistencia óhmica más la resistencia de radiación más la resistencia de pérdidas por corrientes de torbellino, etc. Con un aumento de la frecuencia a generar disminuye R_a muy rápidamente, porque L disminuye naturalmente, C_r queda constante ya que representa la capacidad interna de la válvula y R aumenta por el aumento de pérdidas, ocasionadas especialmente por corrientes de torbellino y pérdidas en el dieléctrico. De esto se deduce que para ondas cada vez más cortas ha de aumentar cada vez más el factor de reacción; llegando éste finalmente a los límites en que ya no es realizable materialmente, y la excitación del circuito se hace imposible. Este hecho se visualiza fácilmente al examinar más adelante un circuito en el cual el factor de reacción es constante e igual a la relación entre las capacidades internas placa-catodo y reja-catodo. Si el factor de reacción necesario llega a ser superior a este valor se hace imposible la generación de ondas de esa longitud con esa válvula. Pero antes de ser alcanzado ese límite inferior, el rendimiento del oscilador ha bajado en forma tan considerable que la generación de ondas de esta gama ya se ha hecho antieconómica. Para que un oscilador a reacción rinda la potencia máxima es necesario que:

$$(R_a = R_{lim} = 2 U_a / I_s)$$

en donde U_a es la tensión continua en placa e I_s la corriente de saturación. Si ahora la resistencia externa R_a se hace cada vez menor a menor largo de onda, finalmente menor que la resistencia límite R_{lim} , entonces se produce el estado llamado de «baja excitación», la válvula no se utiliza al máximo, el rendimiento es pequeño. Para evitar este estado de cosas es posible seguir dos caminos: mejorar la bondad del circuito oscilante mediante la reducción de las pérdidas por corrientes de torbellino y las pérdidas en el dieléctrico o la reducción simultánea de la resistencia límite de la válvula por medio de la disminución de la tensión continua de placa o el aumento de la

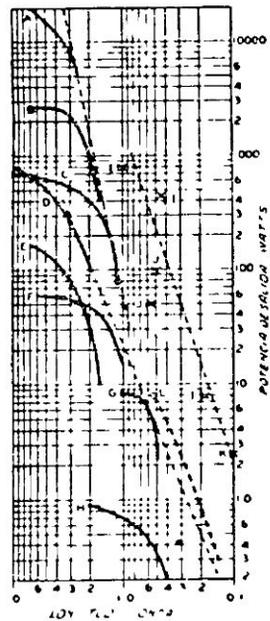


Fig. 1

corriente de saturación. La bondad del circuito oscilante, en ondas decimétricas, puede mejorarse mediante la construcción de circuitos oscilantes especiales, como el de simetría axial de Kolster, el oscilador esférico de Hollmann y las líneas coaxiales o de Lecher. Este último método fué seguido por el autor en el oscilador descrito en el número de enero de REVISTA TELEGRÁFICA. La disminución de la resistencia límite de la válvula por medio de los métodos indicados, disminución de U_a o aumento de I_a , presenta dificultades. Un aumento de I_a sólo es posible a costa de la vida de la válvula. La disminución de U_a no siempre es posible por causa del tiempo de tránsito de los electrones. Llegado el momento en que el período de la oscilación de alta frecuencia llega a ser del orden del tiempo de tránsito de los electrones entre el cátodo y el ánodo, ya no rigen las leyes usuales para circuitos casi estacionarios y el modo de funcionar de la válvula ya no se puede deducir de las curvas características. El modo usual de funcionamiento de la válvula termina en cuanto el largo de onda alcanza el valor de:

$$\lambda > \lambda_{red} = d \frac{c}{v}$$

en donde d es la distancia entre electrodos y c/v un factor que reduce el largo de onda en relación a la velocidad media de los electrones. Si se expresa v en función del potencial de placa resulta:

$$\lambda_{red} = \frac{d \cdot 100}{\sqrt{a}}$$

Sea por ejemplo el caso de $U_a = 500$ volts y $d = 0,5$ cm. entonces la onda reducida es igual a 22 cm., de manera que puede afirmarse que ya a una onda de dos metros cesa el funcionamiento normal de esa válvula por causa de las perturbaciones debidas al tiempo de tránsito de los electrones. La fórmula da a conocer que una disminución de las dimensiones de la válvula, en este caso acercando los electrodos, permite subsanar este defecto. Una disminución del potencial de placa es de resultado contraproducente por su influencia en el tiempo de tránsito de los electrones. Este factor, el tiempo de tránsito de los electrones interviene como una especie de inercia que perturba el mecanismo de la válvula cada vez más a mayor frecuencia, y pasando un límite determinado la reja no puede ya ejercer ninguna función de control. De estas consideraciones se deduce que, la generación de ondas decimétricas, mediante osciladores a reacción, constituye en esencia un problema de la técnica de construcción de válvulas. La fabricación de electrodos de dimensiones muy reducidas y la fijación de los electrodos a distancias muy pequeñas entre sí, como también el empleo de aislantes especiales de pocas pérdidas, vidrios especiales, etc., son problemas de la construcción de válvulas para ondas decimétricas. Resumiendo, una válvula para ondas decimétricas ha de cumplir las siguientes condiciones: pequeñas capacidades entre electrodos, cátodos de alta emisión, alta

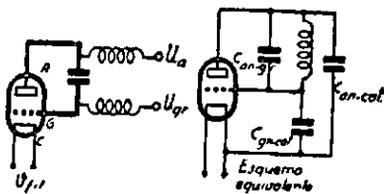


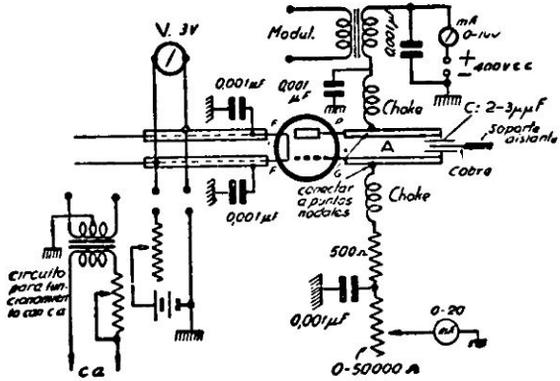
Fig. 2

condiciones: pequeñas capacidades entre electrodos, cátodos de alta emisión, alta

potencia de pérdidas específicas del anodo y distancia entre electrodos lo más reducida posible. El circuito exterior, por su parte, deberá ser construído en forma tal que en lo posible la resistencia externa alcance el valor de la resistencia límite: $R_a = 2 U_a / I_a$. El circuito también debe cumplir condiciones especiales en cuanto a estabilidad de la frecuencia se refiere: deberá ser mecánicamente estable, circuito oscilante de alta calidad, en lo posible completamente blindado para evitar así que la alta frecuencia pase a los conductores de la fuente de tensión y que por esta causa se produzcan alteraciones de frecuencia por cambio de las capacidades entre los conductores de la fuente de alimentación. Al mismo tiempo queda excluída la influencia por capacidades de las manos.

Otra exigencia importante es la de una buena refrigeración para evitar, o por lo menos disminuir los cambios de frecuencia por dilataciones térmicas. Para evitar el paso de la alta frecuencia hacia los conductores alimentadores de tensión es posible seguir dos caminos: emplear circuitos oscilantes simétricos o bien inductancias de choke. En vez del uso de estas últimas, que sólo resultan prácticas en caso de que el oscilador quede constantemente ajustado a una onda determinada, pues el valor del choke tiene que ser exactamente adecuado a cada onda, es posible usar, siempre que no se quiera emplear la construcción simétrica, líneas coaxiales sintonizables para los alimentadores de tensión. Más adelante se demostrará todavía cómo influye la sintonía de estos conductores de alimentación sobre la frecuencia generada. En cuanto se refiere a la estabilidad de frecuencia, quedaría por estudiar la posibilidad del diseño de transmisores de dos etapas; una etapa oscilador maestro y una de amplificación. Esta solución, muy indicada para ondas de mayor longitud, es de difícil aplicación en ondas decimétricas. Los éxitos alcanzados en este campo mediante este sistema son muy pequeños debido al escaso factor de amplificación de las válvulas en ondas muy cortas.

Antes de continuar con más detalles de los circuitos usados para ondas decimétricas examinemos con ayuda del gráfico de la figura 1 los resultados obtenidos con distintas válvulas especiales para esta gama de ondas. El gráfico indica (4) la potencia útil posible de obtener en función de la longitud de onda. Las curvas A hasta H corresponden a triodos, de los cuales A hasta C son del tipo refrigeradas a agua, mientras que D, E, F, G, son refrigeradas a aire; H es una válvula receptora. Las curvas envolventes indican los límites prácticos de estas series. Los puntos marcados



- 1.—Todos los puntos a masa a la base de cobre
- 2.—Chokes de rf largo 1½" diám. ¼" 15 vtas, N.º 32

Fig. 3

(4) Referencia a la Bibliografía que se publicará en el próximo número, al final de la última parte de este trabajo.

de I hasta K indican las performances de tubos Barkhausen Kurz y magnetrones que no entraremos a considerar en el presente artículo. La curva G es la del triodo Western 316 A, que se caracteriza por su alta emisión. A una longitud de onda de 40 cm. puede rendir todavía 4 watts de potencia útil, a aproximadamente 10% de rendimiento. A 100 cm. de onda se duplican la potencia de salida y el rendimiento. Recientemente fueron construídas una serie de válvulas especiales caracterizadas exteriormente por tener conductores dobles hacia el exterior (5), uno de los cuales da hasta 14 watts a 50 cm. de longitud de onda, compitiendo por lo tanto seriamente con los magnetrones.

Ya quedó dicho algo sobre el circuito para el oscilador a reacción. La capacidad del circuito oscilante la constituye la capacidad reja-placa, la inductancia la forma el conductor conectado entre placa y reja. Esta conexión es a veces difícil de realizar tratándose de ondas extremadamente cortas por cuyo motivo es necesario hacer uso de líneas de Lecher. La figura 2 muestra un circuito de oscilador a reacción para ondas decimétricas junto con el esquema equivalente. En lugar del estribo de unión entre reja y placa se puede usar un sistema de Lecher o una línea coaxial. La corriente del circuito oscilante es G veces mayor que la corriente de placa (G es el factor representativo de la bondad del circuito oscilante (6), esta corriente entra al tubo por los electrodos como corriente capacitiva. Por este motivo los electrodos deberán ser dimensionados para esta carga suplementaria. Un examen al circuito equivalente de este oscilador nos hará conocer el factor de reacción K mencionado al principio de este trabajo. K es la reacción entre la tensión alterna de rejilla y la de placa, luego:

$$K = -\frac{U_g}{U_a} = -\frac{R_{gr-cat}}{R_{an-gr}} + R_{gr-cat} = \frac{C_{an-cat}}{C_{gr-cat}}$$

o sea el factor de reacción es constante e igual a la reacción entre la capacidad interelectrónica anodo-catodo y reja-catodo. La figura 3 muestra otro circuito, aconsejado por la firma Western, en el que el estribo, respectivamente el sistema de Lecher, no está cerrado por un condensador de pasaje sino que por un pequeño condensador de sintonía. Las tensiones de alimentación de reja y placa deben ser colocados en los puntos nodales de las corrientes de alta frecuencia, puntos que deben ser determinados para cada largo de onda. Para el aumento de la potencia del transmisor como también para mejorar las condiciones de adaptación al circuito externo de consumo, se puede hacer uso de la conexión en paralelo o push-pull. Este último es especialmente conveniente por su construcción simétrica, por cuyo motivo no se hace necesario el empleo de los chokes de alta frecuencia ya que las tensiones de alimentación pueden ir colocadas en los puntos de simetría. En el número de enero de REVISTA TELEGRÁFICA (6) describe el autor un interesante circuito asimétrico para ondas decimétricas, en el cual se utilizan líneas coaxiales para el circuito oscilante como también para el bloqueo de los alimentadores de tensión de filamento.

Con esto dejaremos el capítulo de los osciladores a reacción aplicados a la generación de ondas decimétricas para continuar ocupándonos en un artículo próximo de los otros tipos de osciladores especiales para estas frecuencias tan elevadas.

(5 y 6) Referencias a la Bibliografía que se publicará en el próximo número, al final de la última parte de este trabajo.

(Continuará).