

En el artículo “Voces secretas, encriptación telefónica en los años 20” (ANTENA n.º 179) se explicaron los primeros sistemas de encriptación de la voz. Este artículo muestra el progreso, tanto cronológico como conceptual de esta aventura tecnológica, durante los años 30 y 40. Describe el uso del Vocoder y una curiosa válvula conmutadora. Por primera vez, el ruido será la clave analógica para codificar la voz.

Voces secretas. El Vocoder, el ruido y los conmutadores

Luis Fernando Real Martín,
Ingeniero Técnico de Telecomunicación
lrealmar@gmail.com



Luis Fernando Real Martín

— Pero si no hay puerta o la puerta está abierta, ¿para qué sirve la llave?
— No hay puerta, pero hay llave... que además es sonora.
— Una llave sonora. O sea un ruido.
— O una música. O un sonido.
— ¡A lo mejor no es una “llave” sino una “clave”!. Podría ser una clave musical, una clave de Sol.

...
— Se diría que nuestro destino es ir en busca de llaves y puertas... sonrió Jason, dirigiéndose al amigo.

“La tienda de los mapas olvidados”.
Ulysses Moore.

LAS TÉCNICAS MÚLTIPLEX

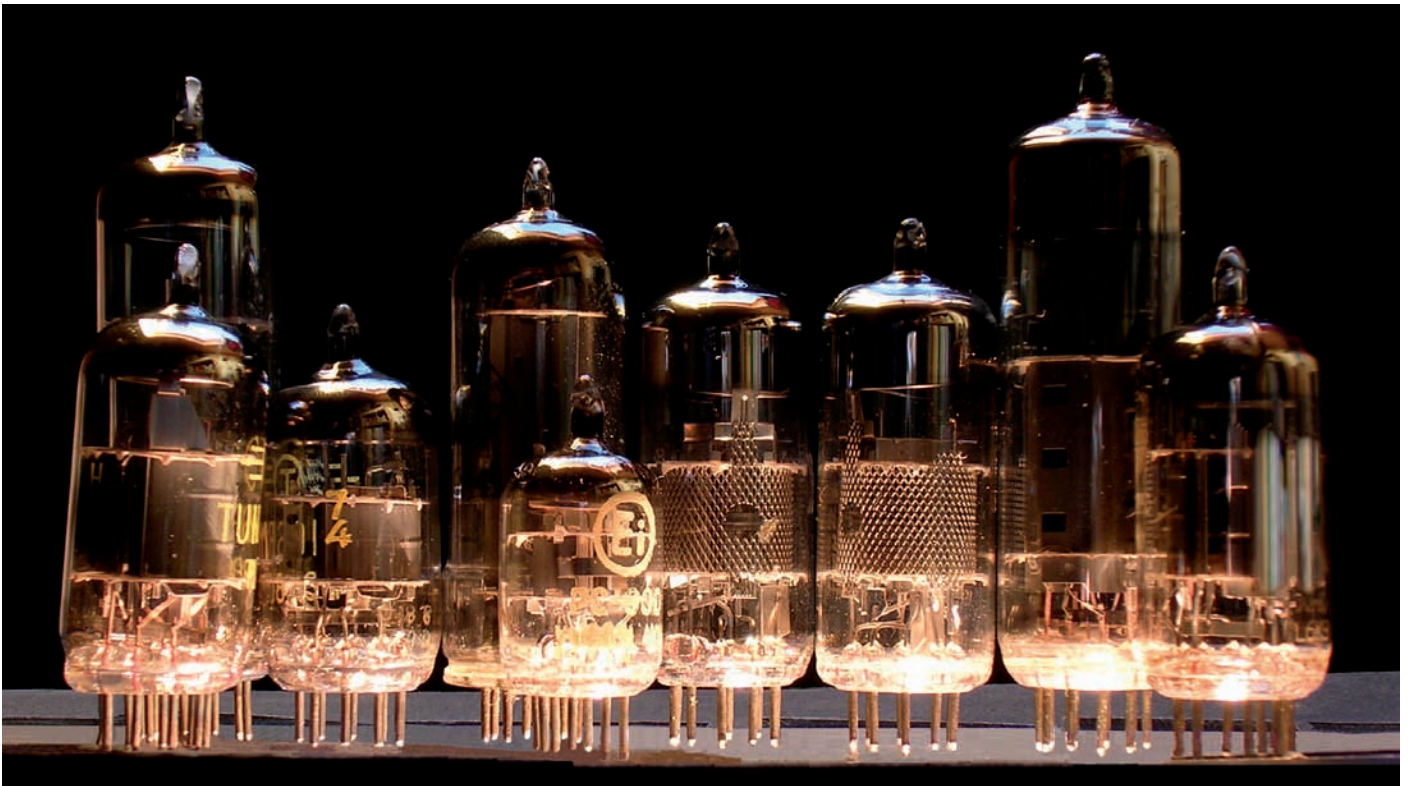
Las primeras encriptaciones de voz se consiguieron dividiendo el espectro vocal del hablante en varias subbandas. Varios moduladores balanceados las recolocaban, creando un nuevo espectro que era el transmitido al receptor. Desde la perspectiva de la criptología, estas subbandas son elementos que se encriptan mediante una regla de *trasposición*. La adición de sistemas múltiplex por división del tiempo al anterior añadía más complejidad y seguridad al mensaje. En este artículo conoceremos los primeros circuitos creados en los Laboratorios Bell y en AT&T.

DISTRIBUIDORES MECÁNICOS ROTATIVOS

Hacia 1938 William R. Bennett, Robert C. Mathes, y Eugene Peterson trabajaron en las técnicas de división de la frecuencia y del tiempo como método de

encriptación para comunicaciones telefónicas. Las subbandas o canales se obtenían mediante filtros selectivos que se modulaban para separarlas y evitar los solapamientos. Estos canales se conectaban a un conmutador rotativo o distribuidor, como los utilizados en telegrafía, que los seriaba a la línea de transmisión telefónica. El receptor efectuaba la operación inversa para recomponer el espectro original. En definitiva, constituía una encriptación por *dobles trasposiciones*. Una regla aplicada a la posición de las subbandas en el nuevo espectro y la otra a su orden de emisión según la conexión al conmutador rotativo. La Figura 1 es un ejemplo, muestra el circuito emisor diseñado por R. C. Mathes en 1941.

Estos trabajos permitieron deducir algunas características que debían tener los conmutadores rotativos y cómo afectaban a la señal vocal final. Por ejemplo, la velocidad de rotación del frotador, el contacto móvil, debe ser más del doble de la frecuencia más alta en cualquiera de los canales (es el criterio de Nyquist para el muestreo de señal, en este caso mecáni-



Válvulas electrónicas. Fotografía del Autor.

co). La longitud de los contactos determina la presencia de la señal en la línea y la separación que entre ellos debe ser tal que impida la diafonía por la persistencia de la energía en la línea del canal anterior. Además, presentaban otros problemas más comunes. Al rozamiento, a la oxidación de los contactos y al desgaste de las piezas metálicas, había que añadir la dificultad de mantener una velocidad constante y estable. Las mejores alternativas a los conmutadores eran los relés,

tampoco exentos de deterioros. No obstante, para diseñar unos conmutadores fiables quedaba por investigar la utilización de las versátiles válvulas termoiónicas.

DISTRIBUIDORES «BEAM SWITCHING TUBES»

Una de las soluciones más interesantes se debió a Albert M. Skellett. Doctor

en Astrofísica por la Universidad de Princeton en 1933. Durante sus primeros años en los Laboratorios Bell estudió, junto con W. M. Goodall, la propagación de las ondas a través de la ionosfera. Posteriormente diseñó válvulas especiales para radio como magnetrones y osciladores de alta frecuencia. En los años cuarenta construyó las primeras válvulas que usaron el haz de electrones como un conmutador rotativo para construir multiplexores y demultiplexores.

La válvula típica es un triodo compuesto de un cátodo, una rejilla y un ánodo. El cátodo emite electrones libres que atraviesan la rejilla atraídos por la polaridad positiva del ánodo. Pequeñas variaciones en la tensión entre la rejilla y el cátodo (la señal de entrada) modifican el flujo de electrones que se traduce en amplios cambios en la tensión entre el ánodo y el cátodo y por lo tanto, mayor circulación de corriente (la señal de salida). Es el fenómeno de la amplificación. Las válvulas conmutadoras presentan varias rejillas y ánodos. Señales de canales de entrada independientes se conectan a cada rejilla y se amplifican en su correspondiente ánodo durante el instante en que el haz es dirigido en su dirección. Una bobina alrededor de la ampolla de vidrio, próxima al cátodo, crea un campo

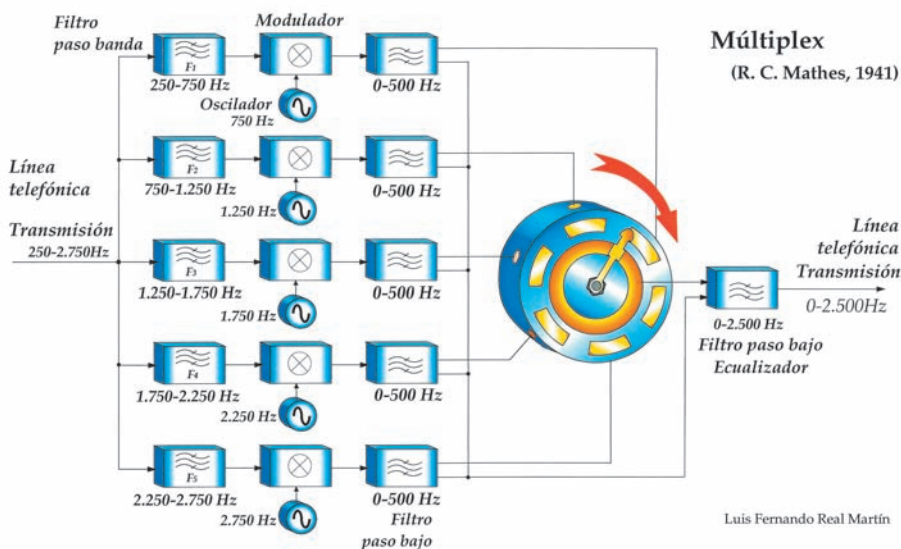


Figura 1. "Secret telephony" de Robert C. Mathes, basado en la patente US.3.967.066. Dibujo del autor.



Figura 2. Válvula "Beam-X switch" BX1000 de Burroughs Co. Cortesía de Jeremy M. Harmer, (www.tubecollector.org)



Figura 3. Válvula "Trochotrón" VS10G de Hivac. Cortesía de Jeremy M. Harmer, (www.tubecollector.org)

electromagnético que afecta al haz. Las variaciones de la corriente por la bobina modifica el campo de forma que controla la deflexión del haz de un ánodo a otro.

La fabricación industrial de válvulas conmutadoras comenzó en los años cincuenta. Se conocen como "Beam Switching Tube, BST", "Beam-X Tube, BXT" o "Trochotrón" (Figuras 2, 3 y 4). Una descripción del trochotrón se puede encontrar en el clásico libro Millman & Taub. Estas válvulas se utilizaron principalmente como contadores junto con los tubos "Nixie" que dibujaban los números en cátodos incandescentes.

La válvula multiplexora o distribuidora de Skellet de 1939 aparece a la izquierda de la Figura 5. Varios ánodos con sus correspondientes rejillas rodean al cátodo. En la conmutación, el haz se dirige de un ánodo al contiguo gracias a la acción del campo magnético externo. Cuatro solenoides dispuestos en la cara interna de un grueso anillo de hierro, que actúa de núcleo común, crean el campo magnético. La válvula se inserta en el anillo y los planos de los solenoides queda paralelos al eje de la válvula. La corriente por un solenoide crea el campo magnético y los electrones del haz se concentran paralelos a él. Cada solenoide se alimenta con una corriente alterna con la fase y polaridad adecuada de forma que el campo magnético resultante produzca un movimiento radial del haz alrededor del eje del cátodo. Según la representación vectorial de la Figura 6, en un instante dado, un solenoide situado

sobre el eje y genera el campo By_1 y otro sobre el eje x , el campo Bx_1 siendo la suma de ambos el campo B_1 . Conforme varía la corriente que circula por ellos, los campos varían su intensidad, ahora son By_2 y Bx_2 , y el resultante B_2 pasa a ocupar otra posición; así hasta completar una vuelta completa.

El circuito completo se muestra en la Figura 7. Los ánodos están unidos y la corriente de salida multiplexada se transmite al extremo remoto la línea de transmisión. En el otro extremo una válvula demultiplexora recibe la señal que polariza su única rejilla común. A la derecha de la Figura 5 aparece esta válvula; no se han dibujado los solenoides ni el núcleo de hierro. Alrededor de la rejilla se encuentran los ánodos individualizados, cada uno corresponde a la salida de un canal, Figura 7 a la derecha. El flujo de electrones que durante su rotación incide en cada ánodo se regula por la tensión de la rejilla que en el presente instante corresponde a ese canal. De este modo la señal recibida se descompone en sus canales individuales. Las corrientes que circulan por los solenoides deben de estar en sincronía y en fase para que la rotación de los haces coincidan en ambas válvulas.



Figura 4. Válvula "Trochotrón" VS10G, detalle interior.

Estas válvulas presentan bastantes problemas. No sólo en la compleja sincronización de las corrientes en los solenoides, sino por el comportamiento de los electrones dentro de las válvulas. Algunos electrones del haz se desviaban a los ánodos adyacentes atraídos por su potencial provocando una corriente residual que se traduce en ruido. Para evitarlo, Skellet tuvo que añadir entre las rejillas y los ánodos unas placas de aislamiento que, polarizadas negativamente, concentraban el haz y evitaban la fuga de electrones, pero sin impedirles el paso al ánodo correspondiente. Estas válvulas tienen una peculiaridad adicional. La presencia del campo magnético concentra a los electrones a lo largo de su eje, pero se crean dos haces en sentidos opuestos, que se perturban mutuamente. Para conseguir un único haz, las placas de aislamiento opuestas deben tener un potencial mayor capaz de frenar la salida de electrones. Este potencial tiene que variar conforme rota el haz.

SISTEMAS BASADOS EN EL VOCODER

La estrella de los Laboratorios Bell en los años 30 era el compresor y sintetizador de voz, Vocoder. Su creador, Homer W. Dudley, lo modificó para encriptar los mensajes de voz. Para comprender este mecanismo es necesario conocer como funciona el Vocoder. El lector puede encontrar más información sobre su origen y evolución en "El Vocoder, la voz de la lluvia" y "El Voder, el mundo del mañana" del número 173 y 174 de ANTENA.

EL VOCODER

A continuación una descripción somera del Vocoder de 1939 representado en la Figura 8. A la izquierda se encuentra el circuito analizador compresor que transmite la información al circuito receptor sintetizador de la derecha. La frecuencia de la voz del micrófono se separa en subbandas mediante filtros (F_1 - F_{10}) que recogen las variaciones de energía (D_1 - D_{10}) a lo largo del tiempo y lo transmite en los

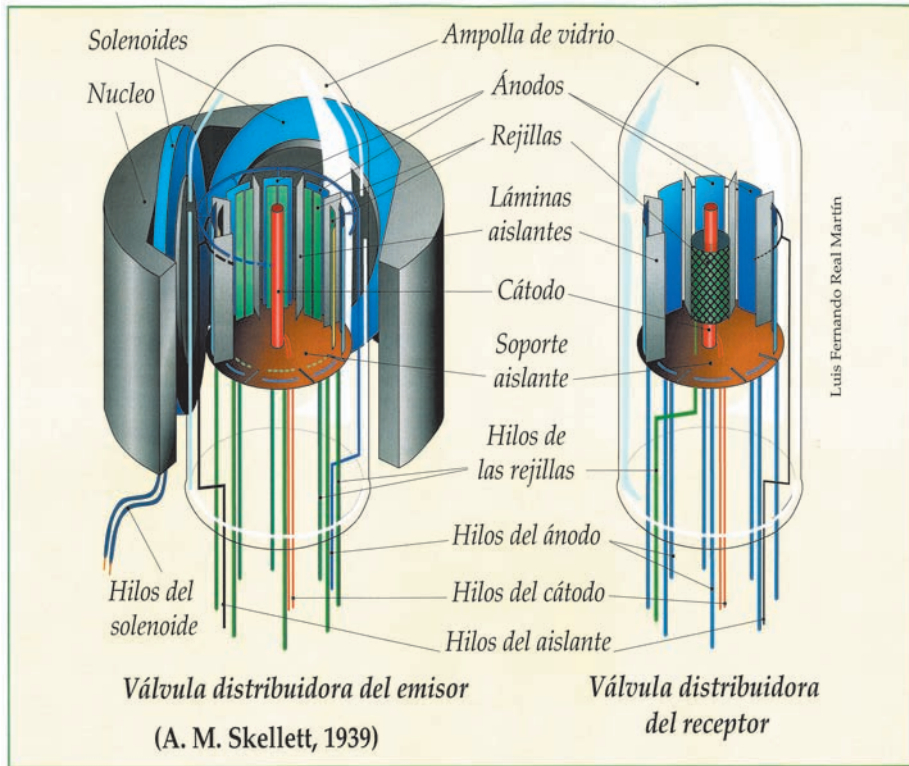


Figura 5. Modelo de válvula conmutadora de A. Skellett, 1939. Dibujo del autor.

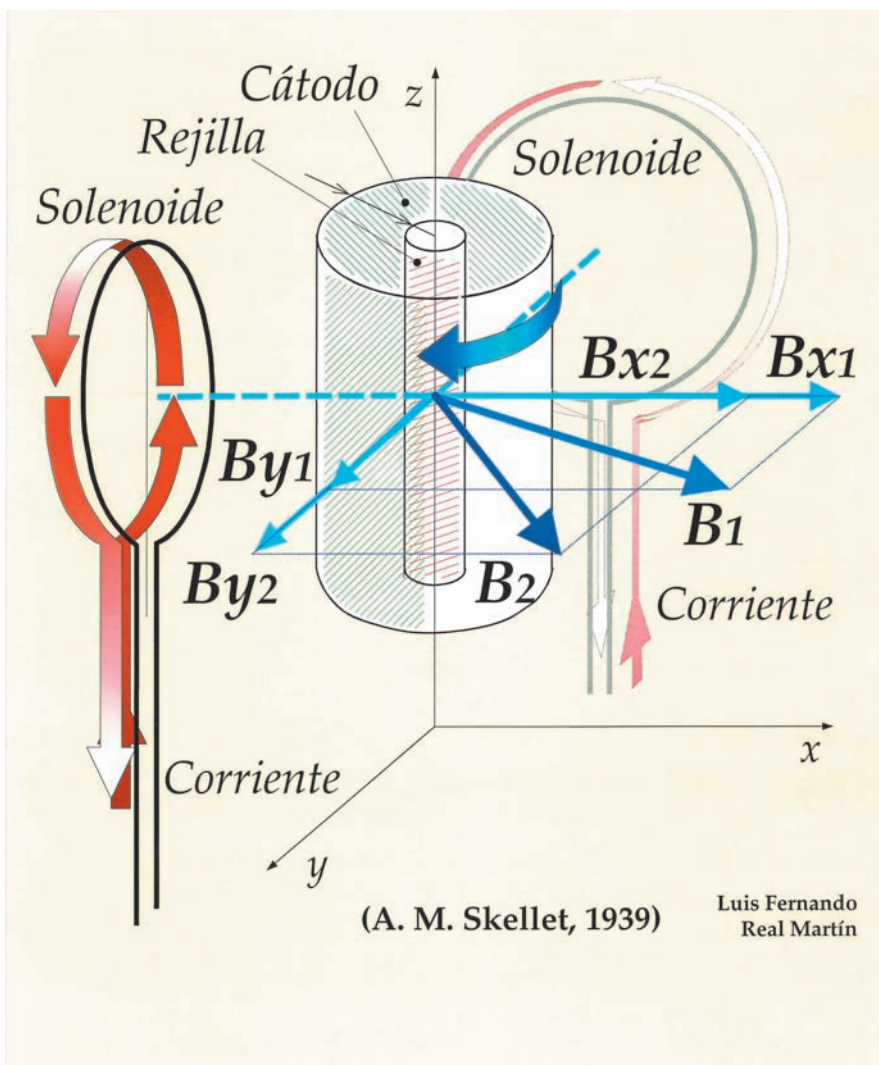


Figura 6. Movimiento rotativo del campo magnético y del haz de electrones. Dibujo del autor.

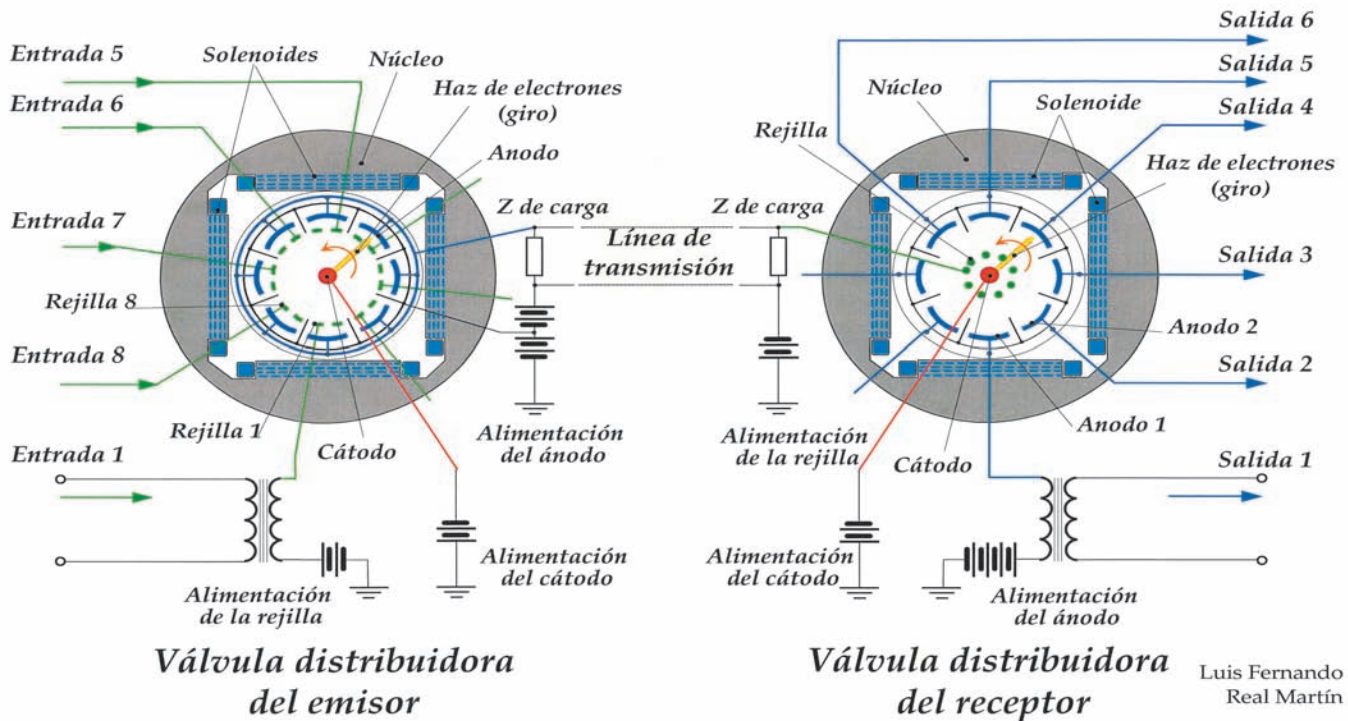
canales PA_1 - PA_{10} al receptor. Otro filtro (F_0) recoge las variaciones de la frecuencia fundamental de los sonidos (D_0) y la transmite en el canal PF_0 . Las variaciones de energía de las subbandas (módulos de color naranja) y de la frecuencia (módulos verdes) constituyen el “patrón de amplitud” y el “patrón de frecuencia” de la señal vocal, de aquí proviene la función analítica del Vocoder. El ancho de banda del conjunto de los canales enviados al receptor es menor que el origen vocal, es el carácter compresor. El receptor debe regenerar el sonido solo con las variaciones de energía y de frecuencia. Procede del siguiente modo. El receptor aporta localmente dos tipos de frecuencias, una constituida por ruido, *hisser*, y otra por un oscilador armónico *buzzer* que ayudarán a regenerar las frecuencias fundamentales de los sonidos. El canal de frecuencia PF_0 regula el grado de intervención de uno u otro a la vez que la información de los canales PA_1 - PA_{10} modela estas frecuencias en los mezcladores AV_1 - AV_{10} de cada subbandas. Un ecualizador final, AL, reconstruye el espectro vocal original. De esta forma, el extremo receptor del Vocoder descomprime y sintetiza una nueva señal vocal.

MÚLTIPLEX DE H. DUDLEY

H. Dudley en 1941 utilizó las válvulas de A. Skellett para conmutar los canales del Vocoder al mismo tiempo les añadía la clave. La clave es ruido térmico, previamente amplificado y grabado en un disco de vinilo. La elección del ruido es debido a la cualidad aleatoria que aporta a la clave. La voz encriptada es invulnerable para quien intente extraerla “pinchando” la línea telefónica.

La Figura 9 muestra el circuito emisor, a la izquierda se encuentra el circuito analizador de voz del Vocoder. A la derecha, el giradiscos con el disco. El ruido del disco pasa a través de un analizador similar al de la voz. En el centro de la figura se encuentra la válvula conmutadora con los canales de la voz y del ruido conectados a las rejillas opuestas. Sus señales regulan el flujo del doble haz de electrones. El ánodo recibe al mismo tiempo la señal de un

Sistema múltiplex (A. M. Skellet, 1939)



Luis Fernando Real Martín

Figura 7. Sistema múltiplex con válvulas conmutadoras. Dibujo del autor.

canal y de la clave. La suma de ambas se expone en la salida de la línea de transmisión. El haz gira para sumar otro canal y su ruido clave. El circuito de control del haz y el motor del plato

del disco tienen la misma sincronización. Un oscilador le hace girar a una velocidad de rotación de 25 cps. En la línea, junto con el mensaje se envía un pulso del oscilador para que el receptor

regeneren sus sincronismos. El módulo G es un ecualizador y AL un amplificador que adapta las impedancias a la línea de transmisión.

La Figura 10 muestra el circuito receptor que tiene un disco con la misma clave. La extracción del pulso de la línea permite sincronizar el giradiscos y los haces de electrones en las válvulas V_1 y V_2 . En cada instante, según gira el haz en la válvula V_1 , extrae la información de ruido correspondiente a cada canal. Un amplificador Ad resta el ruido a la señal recibida por la línea; de este modo, los canales son descryptados. La válvula V_2 los demultiplexa y entrega a un sintetizador de Vocoder que regenera la señal vocal original.

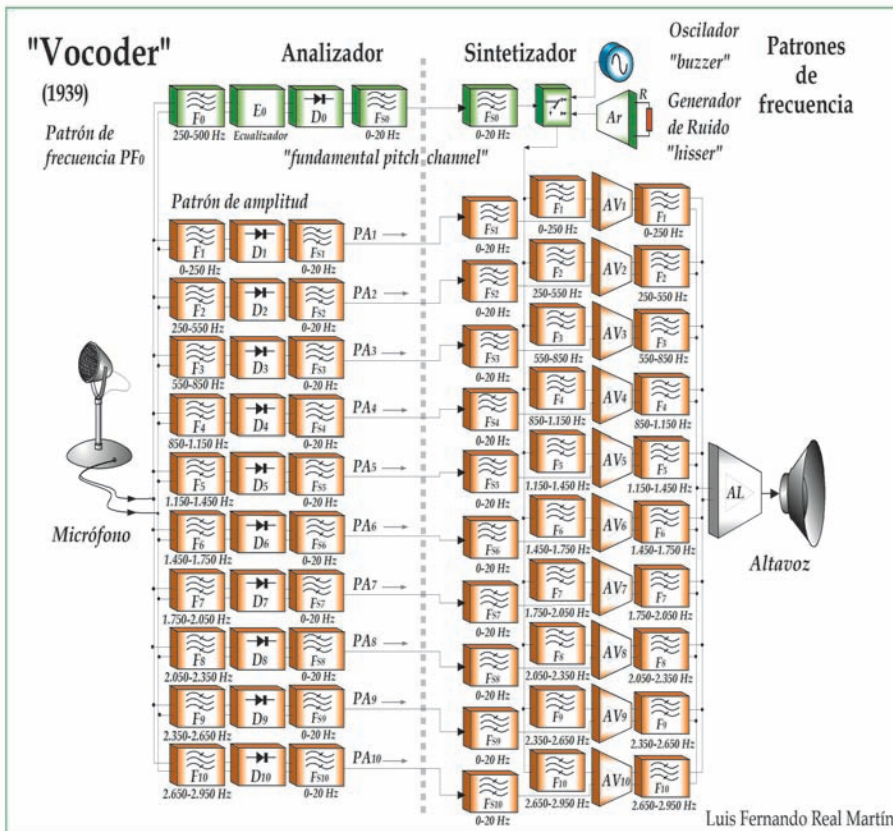


Figura 8. El Vocoder de H. W. Dudley. Dibujo del autor.

CONCLUSIÓN

El conmutador mecánico o su equivalente de haz de electrones pronto fueron abandonados. Pero la notoriedad de estos sistemas fue el uso del Vocoder y del ruido. El primero, por su capacidad para regenerar la señal vocal a partir de sus parámetros, y el segundo, por su aleatoriedad, cualidad de una buena clave secreta. Diseños más complejos reafirma-

Circuito emisor (H. W. Dudley, 1941)

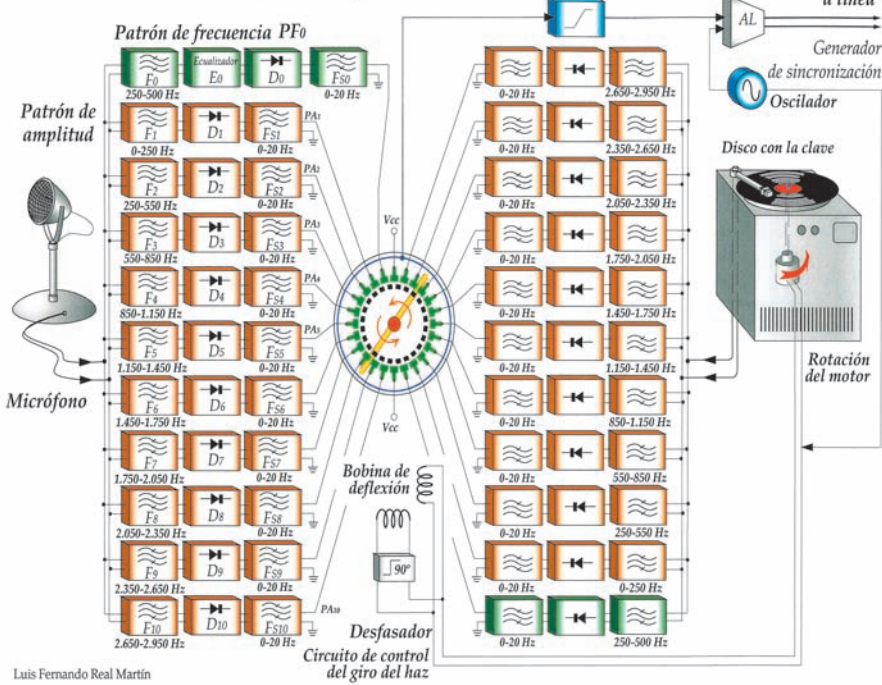


Figura 9. Transmisor encriptador telefónico de H. Dudley. Dibujo del autor.

ron su eficacia, a la vez que abandonaban el mundo analógico para ingresar en el mundo cuantificado, discreto, antesala

del digital. Veremos estos sistemas de encriptación de los años 40 en próximos artículos.

Circuito receptor (H. W. Dudley, 1941)

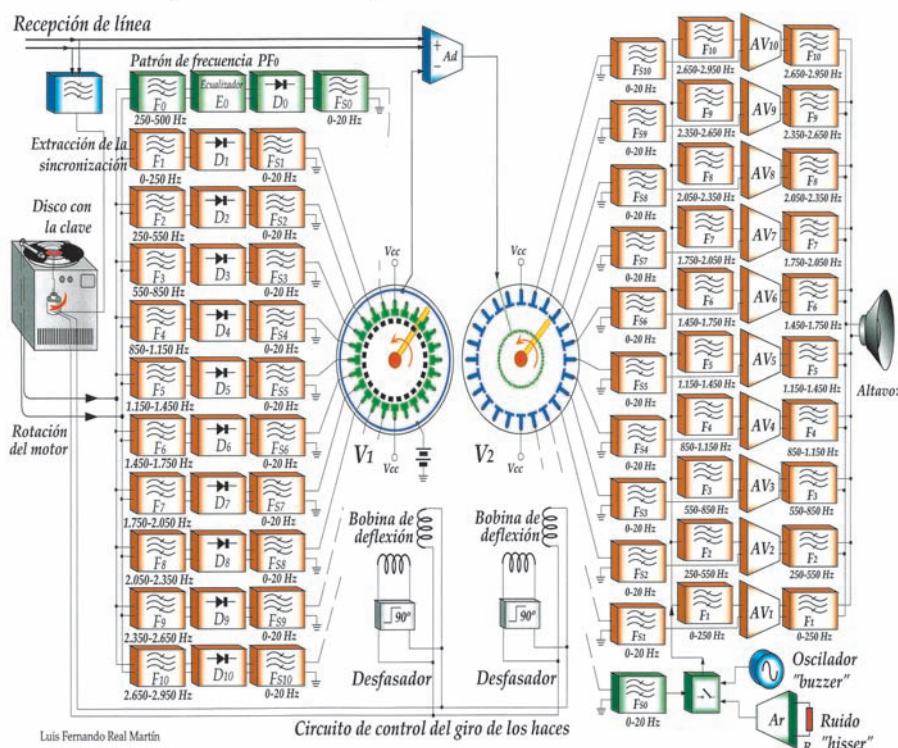


Figura 10. Receptor desencriptador de H. W. Dudley. Dibujo del autor.

REFERENCIAS

REAL Martín, Luis Fernando. "Voces secretas. Encriptación telefónica en los años 20" *Antena* Núm. 179, abril 2010. Edita COITT.

http://www.coitt.es/res/revistas/06a_Voces_PU1.pdf

REAL Martín, Luis Fernando. "El Vocoder, la voz de la lluvia" *Antena* Núm. 173, septiembre 2008. Edita COITT.

http://www.coitt.es/res/revistas/05b_Vocoder.pdf

REAL Martín, Luis Fernando. "El Voder, el mundo del mañana" *Antena* Núm. 176, junio 2009. Edita COITT.

http://www.coitt.es/res/revistas/08d_Rep_Voder_MN3.pdf

Compañía AT&T.

<http://www.att.com/history/index.html>

BELL TELEPHONE LABORATORIES.

<http://www.bell-labs.com/about/history/index.html>

Holding de empresas de AT&T. BELL SYSTEM

<http://www.bellsystemmemorial.com/about.html>

MATHES, Robert C. Estados Unidos patente núm: 3.967.066. "Secret telephony".

SKELLETT, Albert M., Estados Unidos patente núm: 2.217.774. "Electron discharge apparatus".

Información sobre "Beam switch tube" Modelo 6700 y BX1000 de Burroughs Corporation, y el Trochotron VS10G

<http://www.tubecollector.org/6700.htm>

<http://www.wps.com/archives/tube-datasheets/Datasheets/Burroughs-6700/index.html>

<http://www.tubecollector.org/bx1000.htm>

<http://www.tubecollector.org/vs10g.htm>

<http://www.mif.pg.gda.pl/homepages/frank/sheets/022/v/Vs10G.pdf>

MILLMAN, Jacob y TAUB, Herbert. Circuitos de pulsos, digitales y conmutación. Ed. Mc Graw-Hill, México 1979.

DUDLEY W. Homer. Estados Unidos patente núm: 2.151.091. "Signal transmission".

DUDLEY W. Homer. Estados Unidos patente núm: 3.985.958. "Secret telephony".