



## Aplicaciones del tubo de rayos catódicos de Wehnelt.

POR EL

DR. WILH. ZIEGLER

En el año 1897 publicó F. Braun un trabajo en que describió un tubo de rayos catódicos, llamado hoy día, tubo de Braun i que permite estudiar hasta los últimos detalles las propiedades de corrientes cuya intensidad varía rápidamente. La figura 1 nos la

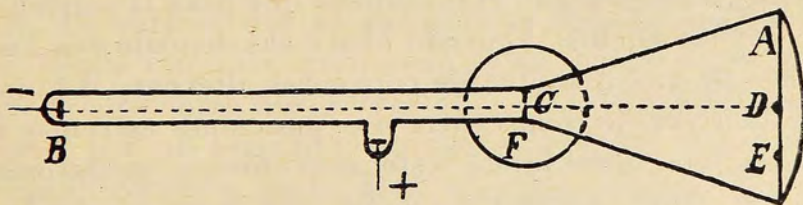


Fig. 1

representa. Consiste en un tubo cilíndrico angosto de 30 cm de largo que se ensancha cónicamente hacia el otro extremo, siendo el largo de la parte cónica de

19 cm. En el fondo se encuentra una pantalla cubierta de una sustancia fluorescente, *A*, i frente a ella el catodo *B*, de que parten los rayos catódicos que sólo pueden pasar por el diafragma circular en *C* i que al llegar a la pantalla excitan la fluorescencia i aparece en ella un punto verde *D*.

Quando se acerca a los rayos catódicos un imán, poniendo por ejemplo adelante el polo norte i detrás del tubo el polo sur, los rayos sufren una desviación segun la regla de la mano izquierda del electromagnetismo. La dirección de la corriente sería la de *A* a *C*, la dirección de las líneas de fuerza la de adelante hacia atrás i entonces, según la regla indicada, los rayos catódicos se desvían hacia abajo i el punto fluorescente se mueve talvez hasta el punto *E*, dependiendo la distancia *D E* de la intensidad del campo magnético.

Igual efecto que el obtenido con el imán produce un solenoide *F* por el cual pasa una corriente. Colocándolo al lado del tubo, las líneas de fuerza que hai en su interior van en dirección horizontal i perpendicular a los rayos catódicos, de modo que producen también una desviación de los rayos catódicos hacia arriba o abajo según el sentido en que pasa la corriente por las vueltas. Uniendo ahora el solenoide con los polos de una máquina de corrientes alternas, el punto fluorescente oscila entre dos posiciones extremas i si todavía observamos este movimiento oscilatorio en un espejo rotatorio resulta una línea sinosoide.

Como se puede graduar el tubo proveyendo la pantalla de una escala i fijándose en las desviaciones que experimenta el punto fluorescente por corrientes continuas de intensidad conocida, es fácil leer directa-

mente los valores momentáneos de la intensidad de corrientes alternas.

Este método tiene la gran ventaja que los fenómenos observados no están oscurecidos por las oscilaciones propias del aparato indicador i que en él se ha eliminado la inercia que es talvez nula en los rayos catódicos o a lo más mui pequeña.

Leyendo este trabajo de Braun me vino la idea de demostrar directamente por este método la descarga oscilatoria de una botella de Leyden.

Por la gran importancia que ha alcanzado esta descarga para el trasformador de Tesla i la telegrafía sin hilos, es mui deseable poderla demostrar en las clases de la manera más convincente. Ya existían métodos de demostración de Feddersen i Koenig, pero todos tienen el gran inconveniente que no permiten perseguir todo el curso de la descarga i dar una idea de los valores de la intensidad en los distintos momentos de la descarga.

Usé para la demostración una batería de Leyden de 4 botellas cuya capacidad era igual a 1 400 cm, i que cargaba mediante una bobina que podía dar chispas de 35 cm. Las botellas se descargaban a través del carrete que se encontraba delante del tubo de Braun i en este circuito se había dejado un espacio de aire entre dos esferas cuya distancia podía variarse por un tornillo micrométrico, el que al mismo tiempo permite medir bien el largo del espacio de aire.

En las primeras esperiencias cada golpe de la bobina dió en el espejo rotatorio una imagen que indica la fig. 2.

¿Cómo se esplica esta figura?

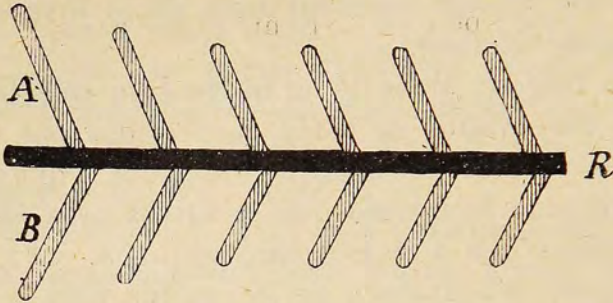


Fig. 2

En el momento en que se cierra o corta la corriente de la espiral primaria se produce una masa eléctrica tan grande que la batería de Leyden puede cargarse varias veces hasta el potencial que corresponde al espacio de aire, de modo que con cada golpe tienen lugar varias descargas parciales.

Cada par (*A* i *B*) de la figura es la imájen de una de estas descargas parciales i consiste en una serie de oscilaciones, en las cuales la velocidad del punto fluorescente es mui grande en la posición de reposo i mui pequeña en los extremos. Por eso la intensidad de la luz fluorescente excitada por los rayos catódicos es mucho mayor en los extremos de las oscilaciones que en cualquier otra parte de ellas i la diferencia puede ser tan grande que se vé únicamente los puntos extremos *a*, *b*, *c*,... (fig. 3) que por su extensión se confunden dando las líneas *A*, *B*, de la fig. 2.

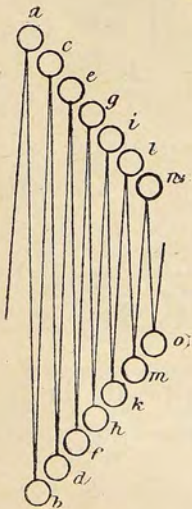


Fig. 3

Las últimas oscilaciones de cada descarga parcial, por las cuales las líneas *A* i *B* se acercan a la línea *R* (fig. 1) que corresponde a la

posición de reposo del punto fluorescente, desaparecen dentro de esta línea que está también iluminada por ser la sustancia que cubre la pantalla más bien fosforescente i no una sustancia fluorescente ideal, lo que quiere decir que la luz excitada dura algún tiempo más aunque ya haya desaparecido la causa de ella como en nuestro caso los rayos catódicos.

Como la fig. 2, todavía no hace ver bien el carácter oscilante de la descarga, resolví cambiar el experimento procurando conseguir un movimiento más lento del punto fluorescente de modo que se marcarían bien las líneas entre los puntos *a...o*. Kirchhoff ha encontrado que la duración de tales oscilaciones puede espresarse por la siguiente fórmula:

$$T = 2 \pi \sqrt{LC}$$

en que *L* significa el coeficiente de inducción refleja i *C* la capacidad del circuito. Haciendo *L* i *C* mui grandes conseguimos un movimiento oscilatorio mui lento. Por este motivo aumenté considerablemente el valor de *L* del circuito intercalando la espiral secundaria de una bobina, que dió una chispa de 15 cm de largo.

Además reemplacé el martillo de Wagner que usaba en las primeras esperiencias, i que siempre exige para su funcionamiento corrientes mui intensas, por un interruptor de mercurio, puesto en movimiento por algunas pilas. Este interruptor tiene la ventaja que se puede disminuir tanto la intensidad de la corriente primaria de la bobina que la masa eléctrica producida por cada golpe apenas alcanza para con-

seguir una sola descarga; esto lo obtuve aumentando al mismo tiempo el espacio de aire en el circuito de la descarga hasta 1 mm. El resultado fué que ahora en vez de las líneas *A* i *B* de la fig. 2, apareció en

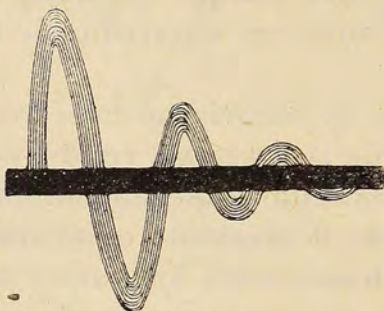


Fig. 4

el espejo rotatorio una curva senoide bien amortiguada como lo indica la fig. 4.

Las amplitudes van disminuyendo rápidamente por que en cada oscilación se neutraliza algo de las electricidades de modo que en las siguientes siempre se mueve menos electricidad i la desviación del punto fluorescente es menor.

Manteniendo la gran inducción refleja, pero disminuyendo el espacio de aire en el circuito de la descarga hasta  $\frac{1}{10}$  mm, de modo que cada golpe dé nuevamente varias descargas parciales, resultó la fig. 5, es decir, cada par de las líneas de la fig. 2 se convirtió en una curva senoide amortiguada, pero en este caso resulta menos amortiguada, lo que se explica fácilmente por la fórmula que Kirchhoff encontró para el decremento logarítmico de tales oscilaciones:

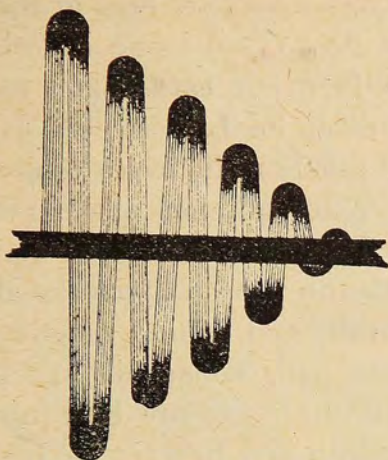


Fig. 5

$$\lambda = \pi R \sqrt{\frac{C}{L}}$$

Esta ecuación nos dice que el decremento logarítmico depende de la resistencia  $R$ , de la capacidad  $C$  i de la inducción refleja  $L$  del circuito en que se efectúan las oscilaciones. Haciendo más grande el espacio de aire, aumenta la resistencia  $R$  i con ella el decremento logarítmico i la amortiguación resulta mayor (fig. 4), mientras es menor (fig. 5) en el caso de que se reduzca el espacio de aire de 1 mm a  $\frac{1}{10}$  mm.

Este método nos permite estudiar todos los detalles de la descarga eléctrica de una botella de Leyden, medir cuantitativamente todos los elementos de ella que nos interesan como intensidad de la corriente, duración de oscilación i decremento logarítmico i examinar cómo dependen de la resistencia, capacidad e inducción refleja del circuito oscilante.

Aunque esta demostración sea talvez la más perfecta de las que se ha ideado, tiene todavía el incon-

veniente que exige aparatos mui grandes i costosos como la bobina de 35 cm i una batería de Leyden, de modo que talvez por esta razón no se prestaría para la enseñanza en los Liceos, pero usando un tubo de Braun no se puede reducir las dimensiones de los aparatos si queremos obtener una curva bien formada, puesto que los rayos catódicos que se producen en un tubo de Braun poseen una velocidad mui grande i por este motivo el campo magnético tiene que ser mui poderoso para conseguir una buena desviación i esto exige una corriente mui intensa que sólo se obtiene cargando una batería de Leyden, de gran capacidad, hasta un potencial bastante alto.

La velocidad con que se mueven los electrones de los rayos catódicos depende de la diferencia de potencial necesaria para producirlos en el tubo i como esta es mui grande, forzosamente tiene que ser también mui grande la velocidad que se acerca a la de la luz.

Si dispusiéramos de rayos catódicos de menor velocidad que son más flexibles, podríamos aplicar corrientes menos intensas i así reducir las dimensiones de la batería i de la bobina.

En el año 1904, Wehnelt descubrió un método que permite producir rayos catódicos de velocidades relativamente pequeñas.

Si en un tubo de que se ha estraído el aire hasta una presión de 0,01 mm, se usa como cátodo un alambre de platino o un filamento de carbono i se le calienta hasta la incandescencia, desaparece la caída de potencial en el cátodo, de modo que ya con una diferencia de potencial insignificante, pasan por el tubo corrientes eléctricas en forma de rayos catódi-



cos. Cunningham encontró que esta disminución de la caída de potencial en el cátodo sólo se produce a temperaturas más altas de 1600°. Pero si se cubre el platino con óxido de Ca, Ba o Sr se consigue la misma disminución a 800°. Los óxidos emiten grandes cantidades de electrones negativos que son independientes de la presión cuando ésta es menor que 0,1 mm.

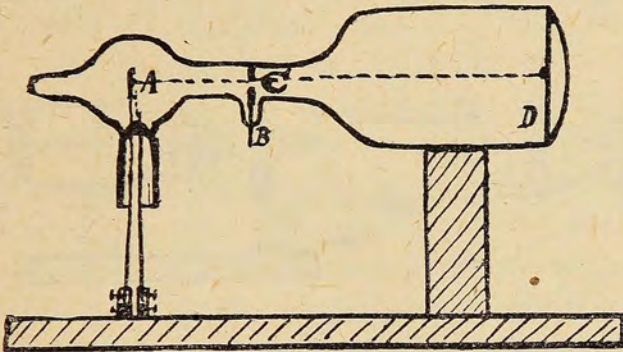


Fig. 6

Si a cierta temperatura se aumenta poco a poco la diferencia de potencial, el número de electrones que salen del cátodo llega a un máximo o como se dice pasa la corriente saturada; esta depende de la temperatura como indica la tabla siguiente:

T	970	1050	1070	1090	1105	1120	1220
$i_{\max} 10^{-8}$ (Amp)...	3,8	23,7	50,7	87,5	200	400	780
BaO. ....							
$i_{\max} 10^{-8}$ (Amp)...	3	30	56	84	140	212	
CaO. ....							

Estos valores nos indican que a temperaturas de  $1100^{\circ}$  salen rayos catódicos mui intensos. Basándose en estos hechos construyó Wehnelt un tubo llamado hoy día, *tubo de rayos catódicos de Wehnelt*, que está representado por la figura 6. El cátodo A es una lámina delgada de platino que está cubierta de *Ba O* i que puede ser calentada hasta la incandescencia por dos acumuladores; el ánodo B consiste en un alam-

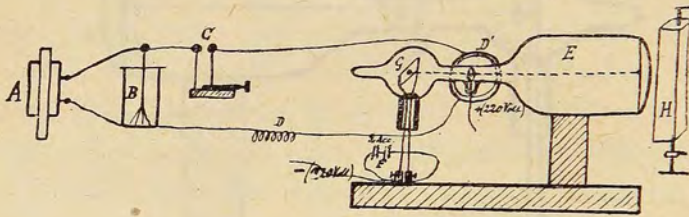


Fig. 7

bre i un disco de aluminio que sirve al mismo tiempo de diafragma.

Se comunica ahora A i B con los polos de la línea de la calle, intercalando todavía una resistencia de agua; sale del cátodo un haz de rayos catódicos bien intensos que en C pasan por un diafragma i producen en la pantalla fluorescente D un punto bien iluminado que se desvía por el campo magnético más insignificante.

Usando tal tubo la demostración de la descarga de la botella de Leyden se hace de la manera siguiente: Mediante una bobina A (fig. 7) de 10 cm de chispa se carga una botella de Leyden B de una capacidad de unos 150 cm, que se hace descargar a través de un circuito que contiene un espacio de aire C, de 1 mm., una inducción refleja D i un carrete D'

de algunas vueltas que se coloca al lado del tubo de Wehnelt *E* cerca del diafragma. Por dos acumuladores *F*, se pone incandescente el cátodo *G*, i se comunica los polos de la línea de la calle con los dos electrodos del tubo intercalando todavía una resistencia de agua.

Cada descarga produce un movimiento oscilatorio del punto iluminado en la pantalla fluorescente, lo que observamos en un espejo rotatorio *H* en que vemos una imagen idéntica con la figura 4.

El tubo de Wehnelt lo he aprovechado también para analizar sonidos de diversos instrumentos musicales, vocales, consonantes i palabras enteras.

Estudios parecidos ya existen: sólo mencionaré los trabajos detallados de Kempf-Hartmann, que ha examinado las curvas de timbres producidas por la membrana de un teléfono. Para obtenerlas pegó un espejo en la membrana i dejó caer sobre él un rayo luminoso que reflejado produjo en un cilindro cubierto de papel fotográfico un punto luminoso. El cilindro se puso en rotación por un electromotor i produciendo delante del micrófono de la misma instalación telefónica un sonido, obtuvo en el cilindro la curva del timbre característica para el sonido.

No cabe duda que la masa del espejo modifica considerablemente las vibraciones de la membrana del teléfono i por este motivo he preferido eliminarla completamente i hacer actuar las corrientes que se producen en el circuito del micrófono sobre los rayos catódicos, que en un espejo rotatorio nos dan directamente la curva de timbre.

El método que apliqué ha sido el siguiente: El ca-

rrete que sirve para desviar los rayos catódicos se coloca al lado del tubo de Wehnelt, cerca del diafragma i se le intercala en un circuito que contiene un acumulador i un micrófono mui sensible.

Para ver hasta qué perfección este método nos reproduce las vibraciones del cuerpo sonoro mediante la lámina del micrófono, hice sonar primero delante del micrófono, un diapason  $Do_2$ . La curva que resultó correspondió exactamente a la esperada, es decir, una curva senoide. (fig. 9.<sup>a</sup>).

Enseguida hice sonar al mismo tiempo  $Do_2$  i  $Do_3$  i esta vez obtuve la curva de la figura 9b, que corresponde a una combinación de un sonido fundamental con su primer sonido armónico.

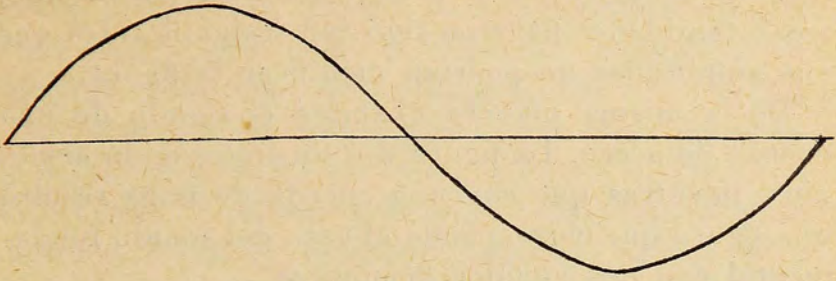
Para mantener constante las amplitudes de los diapasones, aproveché el método de Helmholtz, poniéndolos en oscilación electromagnéticamente.

Después tomé la combinación  $Do_2$ ,  $Do_3$ ,  $Sol_3$  que dió la curva resultante de un sonido fundamental acompañado de sus dos primeros sonidos armónicos. (fig. 9c).

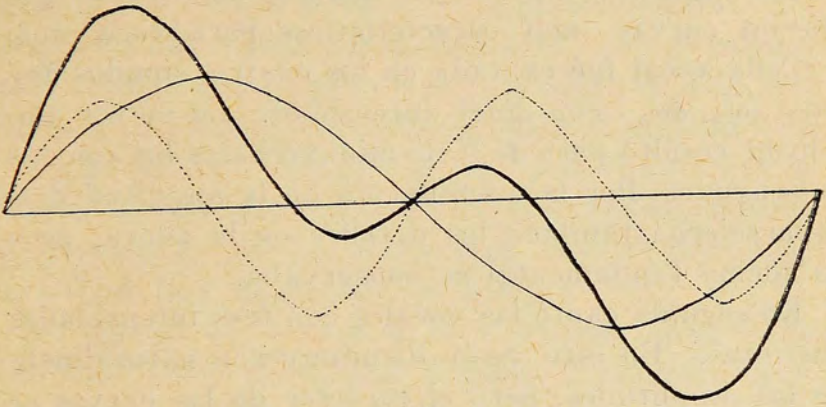
Después de haberme convencido, por el camino sintético, de la completa seguridad de este método continué con el análisis de un tubo sonoro. Según la teoría en un tubo abierto deben producirse todos los sonidos armónicos, mientras que en un tubo cerrado se producen sólo los impares.

La experiencia me dió dos sonidos armónicos en los dos tubos, pero las curvas resultaron distinta conforme a la teoría.

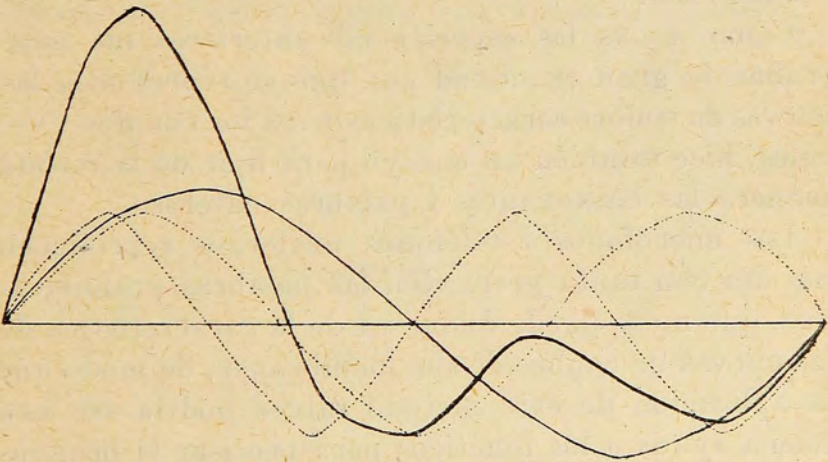
Este resultado está también de acuerdo con el análisis de los tubos que hice con los resonadores de Helmholtz, por los cuales tampoco pude constatar más



*a*



*b*



*c*

Fig. 6

sonidos armónicos i si acaso hubieran tenido más, sus intensidades habrían sido tan insignificantes que sus amplitudes no podrían modificar la figura.

De la misma manera examiné el sonido de una cuerda de acero. La figura dió un sólo sonido armónico, mientras que con una cuerda de tripa resultó una figura que corresponde al caso del sonido fundamental con dos sonidos armónicos.

En seguida sometí a un análisis las vocales que dieron curvas muy características para cada una.

Cada vocal fué cantada en los cuatro sonidos  $do_3$ ,  $mi_3$ ,  $sol_3$ ,  $do_4$  i con igual intensidad. La mayor amplitud resultó para  $do_3$  i disminuyó hacia los sonidos más agudos. Por la disminución de la amplitud desaparecieron también los detalles de la curva, pero la forma fundamental se conservaba.

En seguida canté las vocales con tres intensidades distintas. En este caso disminuyeron naturalmente las amplitudes, pero el carácter de las curvas se conservaba.

Como todas las esperiencias anteriores me mostraban la gran exactitud con que se reproducen las curvas de timbre características para los sonidos i vocales, hice también un ensayo para fijar de la misma manera las consonantes i palabras enteras.

Los micrófonos i teléfonos modernos reproducen hoy día con tanta perfección las palabras pronunciadas, que no se puede dudar ya de la característica de las curvas de timbre de sus membranas, de modo que la aplicación de este método talvez podría ser una buena ayuda a los fonéticos, para precisar la pronunciación de palabras.

He hecho ya algunos ensayos en este sentido, ha-

ciendo pronunciar delante de la membrana del micrófono, por personas de distintas nacionalidades palabras como «Europa», «cargar», etc.

Mientras que las curvas resultaron idénticas cuando hablaron alumnos chilenos, la forma variaba bastante cuando lo hacían personas de otra nacionalidad. La curva permitió distinguir hasta las sílabas de la palabra pronunciada, de modo que era posible indicar dónde estaba el error de la pronunciación i haciendo repetir varias veces la palabra por el extranjero, conseguí una curva que se parecía mucho a la forma de la curva que correspondía al chileno.

En la palabra «cargar» se vió bien claramente la diferencia entre las *r* «lingualis» i «gutturalis», haciendo pronunciar por un extranjero, que no era capaz de hablar la *r* «lingualis», la palabra.

No agrego las curvas a este trabajo, porque ha sido mui difícil dibujarlas a mano libre, pero estoi resuelto a encargar a Europa un aparato fotográfico especial, para poder fijarlas con todos sus detalles.

