

Los convertidores estáticos de vapor de mercurio con rejilla de regulación y sus diversas aplicaciones

I

Descripción y principios fisicotécnicos de los modernos convertidores con rejilla

Es bien conocido el desarrollo que han adquirido en los dos últimos decenios los convertidores de vapor de mercurio, inventados por *Cooper Hewitt* a

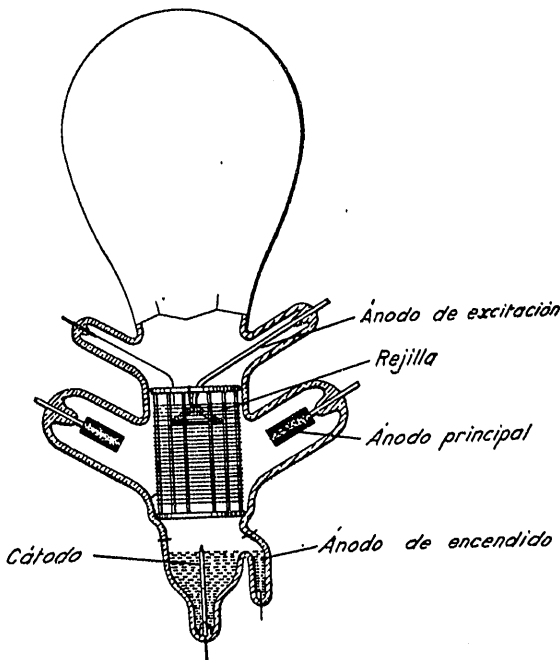


Fig. 1. Thyatron primitivo de Langmuir

principios de siglo. En estos aparatos se rectifica la corriente alterna, convirtiéndola en continua, aprovechando para ello la propiedad de que un arco en vapor de mercurio, en un recipiente cerrado y a una presión de algunos micrones de mercurio, sólo puede existir cuando la corriente va en una dirección, siendo cátodo el pequeño depósito de mercurio en el que termina el arco, y que por la elevada temperatura que alcanza en el extremo de éste se encuentra en un estado de emisión electrónica.

En el año 1914 ideó *Langmuir*¹ (G. E. Co.) un método de regulación del arco en los rectificadores corrientes de vapor de mercurio, disponiendo para ello una *rejilla* o tercer electrodo (fig. 1). Esta rejilla rodea el cátodo de tal manera, que el arco sólo puede llegar a los ánodos atravesándola. Dando a la rejilla una tensión negativa suficientemente alta, respecto al cátodo, se impide la formación del arco entre el mercurio (cátodo) y los ánodos, pues los electrones son repelidos por la carga negativa de la rejilla. Como veremos, todos los procedimientos modernos de regulación de los convertidores estáticos se basan en esta idea fundamental de *Langmuir*, que permite variar el instante de iniciación de la descarga, cam-

biando convenientemente la tensión de la rejilla. *Toulon*, en 1922¹, mejoró el método, ocurriéndosele el crear un defasaje entre la tensión de la rejilla y la de los ánodos (ambos respecto al cátodo), y consiguiendo así, como más adelante explicaremos, amplísimas posibilidades de regulación del arco. En el año 1923 emprendieron *Langmuir* y *Hull* (G. E. Co.) extensos y detenidos estudios sobre la formación del arco en los gases, y estos estudios llevaron a la creación de los convertidores de vapor de mercurio y cátodo incandescente con rejilla de regulación, que en estos últimos años se han industrializado y perfeccionado notablemente. Por último, y animadas las grandes casas constructoras por los resultados obtenidos con la regulación de los convertidores de cátodo incandescente, han vuelto a trabajar, a la vez que en éstos, en los rectificadores ordinarios de vapor de mercurio, de cristal o de hierro, aplicándoles la regulación mediante rejilla, hasta en unidades de gran potencia. Se ha llegado así a un punto en que es tal el porvenir que se prevé para unos y otros convertidores, que casi cabe decir, sin exageración, que estamos en los comienzos de una nueva era en la electrónica, en la cual las descargas en los gases y los fenómenos electrónicos van a asumir en la electricidad industrial un papel análogo al que ya desempeñan en la técnica de las corrientes débiles (telefonía, radio-telefonía, etc.).

Convertidores de cátodo incandescente con rejilla.

Estos convertidores, bautizados por la G. E. Co. con el nombre de *thyratrones* (del griego *θυρα*, puerta), presentan una disposición análoga a las conoci-

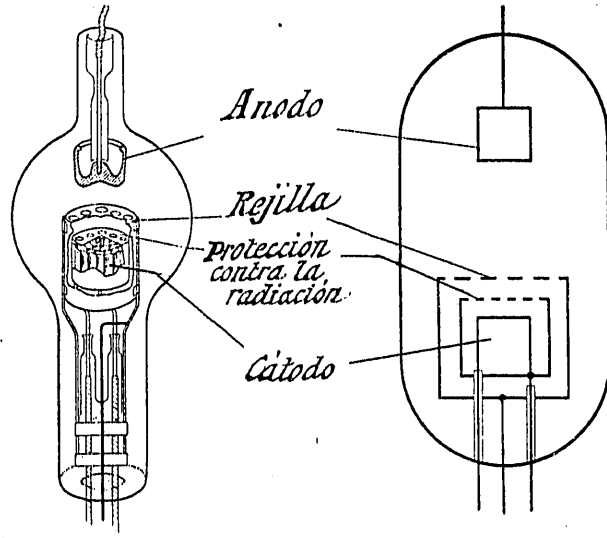


Fig. 2. Thyatron A. E. G.

das lámparas amplificadoras de tres electrodos (*pliotrones*), con la diferencia esencial de que en lugar del

¹ U. S. Pat. 1 289 823. D. R. P. 294 641.

¹ U. S. Pat. 1 654 949. D. R. P. 415 910.

vacío elevadísimo que existe en estas lámparas, en los pliotrones hay una atmósfera muy rarificada de vapor de mercurio, con una presión de algunos micro-nes (entre 1 y 50), estando determinada esta presión por la temperatura de una gota de mercurio, introducida en el recipiente de cristal, y que, en condiciones

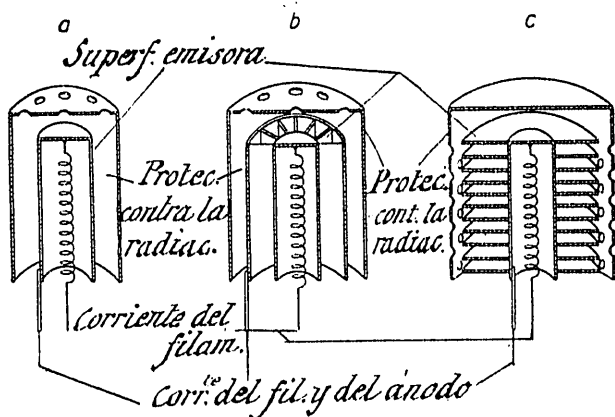


Fig. 3. Cátodos de calentamiento indirecto

estacionarias, se encuentra en el sitio más frío del tubo, en el cuello de entrada del cátodo. El vapor de mercurio producido por esa gota hasta para proporcionar los iones necesarios para mantener la corriente, originándose estos iones por la ionización de choque debida a los electrones del cátodo.

Las formas constructivas de los thyatrones son

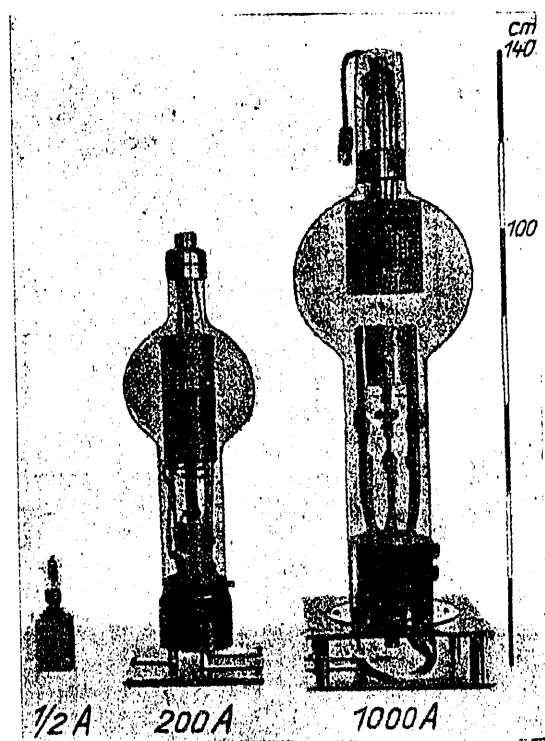


Fig. 4. Thyatrones A. E. G. de diversas potencias

muy diversas. En todos los casos constan de los tres elementos principales siguientes (fig. 2):

1. Un ánodo, de grafito, generalmente situado en la parte superior del tubo.

2. Un cátodo, que en los modernos thyatrones de gran intensidad va calentado indirectamente, y

consta de una chapa de gran superficie, cubierta de una capa de óxido, de gran poder emisor de electrones, como el óxido de bario, por ejemplo, que ya a una temperatura de 800 a 900° C emite suficientes electrones. Esa temperatura del cátodo se consigue por la radiación de un filamento grueso de wolfram, situado en su interior, y que con una corriente auxiliar se calienta hasta una temperatura de 1 500 a 1 800° C. Para economizar energía se procura evitar pérdidas de calor del cátodo, y con este fin se le envuelve con chapas protectoras, perforadas en parte de su superficie, que son un obstáculo para la radiación del calor del cátodo, pero que por sus orificios o huecos dejan salir libremente los electrones y formarse el arco. De esta manera se ha conseguido disminuir la potencia auxiliar necesaria para el calentamiento del cátodo desde unos 60 vatios por amperio, que era

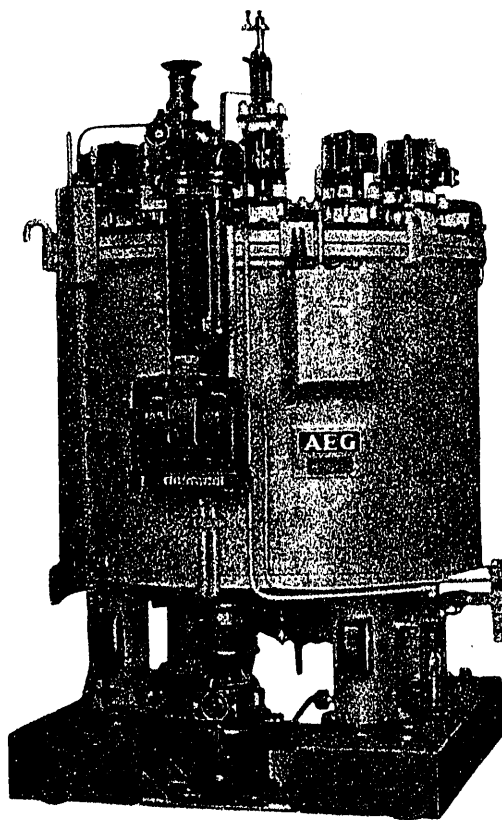


Fig. 5. Rectificador de 650 V, 2000 A

el consumo en los primitivos thyatrones con emisión directa de electrones por el filamento, hasta sólo 0,5 o 1 vatio por amperio. En la figura 3 pueden verse, con más detalle que en la figura 2, algunos tipos recientes A. E. G. de cátodos con calentamiento indirecto.

3. Una rejilla, de forma cilíndrica, que unas veces envuelve al cátodo y otras, como ocurre en los tubos de mucho amperaje, envuelve al ánodo.

La figura 4 da una idea de la disposición general de los thyatrones de diferentes potencias que construye la A. E. G. Como se observará, se han llegado a construir tubos hasta para 1 000 amperios (valor máximo o de cresta), de unos 140 cm de altura. Estos tubos son para una tensión continua de 15 000 voltios, y, por tanto, puede conseguirse con ellos en corriente continua, mediante conexiones apropiadas, hasta 15 000 kW.

Convertidores normales de vapor de mercurio con rejilla.

Estos convertidores son iguales a los que ordinariamente se emplean en electrotecnia como rectificadores, con ampolla de cristal o metálicos (fig. 5); la única diferencia está en los ánodos. Llevan éstos, además de la envolvente protectora, en defensa de los contraencendidos, corriente ya en los rectificadores modernos, una rejilla en forma tubular que cubre completamente el ánodo. En la figura 6 puede verse la disposición indicada. El ánodo, de grafito (1), va envuelto por dos tubos. El exterior (2) corresponde al que en los rectificadores normales protege al ánodo. El interior (3) está perforado y lleva en su parte inferior una rejilla (4), formada por barras de un metal de alto punto de fusión. Un tubo (5), concéntrico con el portaánodo, permite conducir la corriente a la rejilla, estando conectado con el anillo terminal (6). El aislador superior (7) aísla el terminal (8) del ánodo del anillo (6), y el aislador inferior (8) aísla la rejilla de la envolvente del convertidor.

Como suponemos suficientemente conocidos los rectificadores de vapor de mercurio, no entramos aquí en el detalle de su descripción. Recordaremos únicamente—refiriéndonos en especial a los de cuba metálica (fig. 7)—que son de seis o de doce fases, llevando los correspondientes ánodos (10) en la parte alta, sujetos a la tapa (1) de la cuba, en la forma que acaba de indicarse. El pequeño depósito de mercurio, que hace de cátodo, está situado inferiormente, yendo aislado (8) de la cuba, que a su vez tiene que ir aislada del suelo. Para el encendido y para mantener el arco en vacío existen un ánodo (11) de encendido y

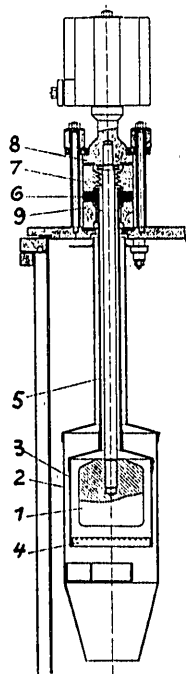


Fig. 6. Anodo con rejilla de regulación

tres ánodos auxiliares (12). Para la condensación del mercurio se prevé un espacio dentro de la cuba, sobre los ánodos. Esta condensación se favorece en los rectificadores grandes, de 2 000 amperios o más, con una refrigeración interna (4).

En el interior de la cuba existe un vacío, que varía

de 1 a 5 micrones de columna de mercurio, mantenido automáticamente con dos bombas, una del tipo de condensación de mercurio (13), que hace el vacío en el recipiente, y otra giratoria (16), para el vaciado del depósito (15) de descarga de la primera.

El principio de la regulación con rejilla se ha lle-

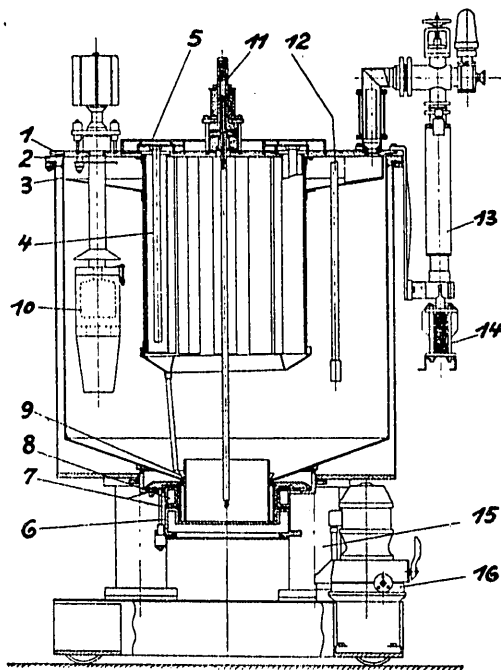


Fig. 7. Corte de un rectificador de 2000 A (sin rejillas)

gado a aplicar en la A. F. G. hasta rectificadores de 600 voltios, 5 000 amperios, y de 3 000 voltios, 200 amperios.

Funcionamiento de los convertidores con rejilla de regulación.

Explicaremos primeramente el funcionamiento de los convertidores con cátodo incandescente (fig. 8) ¹. Supongamos, para fijar las ideas, que entre el ánodo *A* y el cátodo *K* de un thyatron existe una tensión U_A de + 100 V, y que la rejilla *G* tiene un potencial U_G negativo bastante elevado respecto al cátodo; por ejemplo, de - 20 V (fig. 8-I). En estas condiciones, la resultante de los campos electrostáticos del ánodo y de la rejilla, entre ésta y el cátodo, tiene la dirección de abajo a arriba, por predominar el campo de la rejilla. Los electrones emitidos por el cátodo incandescente son repelidos por ese campo, y quedan en la proximidad del cátodo, formando sobre él una nube de electrones. Si se disminuye la temperatura negativa de la rejilla, hasta unos - 5 V, por ejemplo (fig. 8-II), se consigue que algunos electrones atraviesen la rejilla, ionizando el vapor de mercurio entre éste y el ánodo. Pero esta ionización se produce casi exclusivamente cerca del ánodo, adonde llegan ya con suficiente velocidad los electrones, y los iones positivos quedan allí, constituyendo una carga espacial positiva. Si se continúa disminuyendo la tensión negativa de la rejilla, llegará un momento en que la ionización aumenta tan rápidamente, que el arco se establece entre el cátodo y el ánodo (fig. 8-III).

¹ LAUB: "Stromrichtern" (Elektrotechnik und Maschinenbau, números 22 y 23, 1932).

Esta tensión de la rejilla (referida siempre al cátodo o, con más precisión, al punto más negativo del cátodo), para la cual se inicia el arco, se llama *tensión crítica*, U_K ; en el caso de la figura 8-III, sería de -2 V.

Una vez establecido el arco, la tensión U_A entre sus

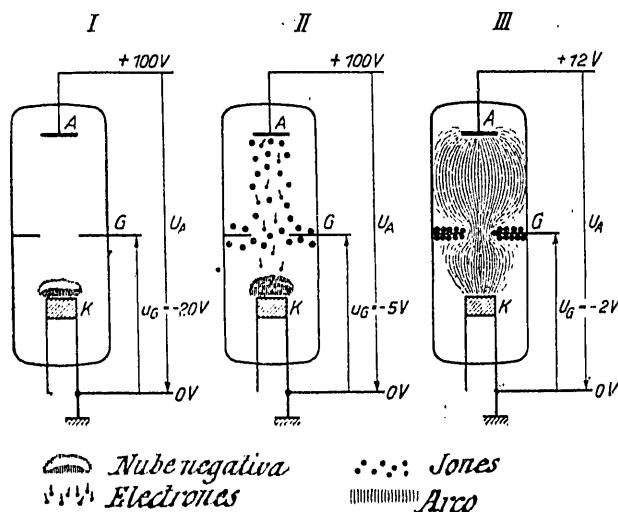


Fig. 8. Intelectación del arco variando la tensión de la rejilla

extremos, es decir, entre ánodo y cátodo, es muy pequeña, del orden de 12 a 15 V en los convertidores de cátodo incandescente. Al mismo tiempo, el campo eléctrico de la rejilla atrae iones positivos del arco, y éstos se depositan sobre ella, envolviéndola (figura 8-III). La carga positiva de esos iones anula el efecto de la carga negativa de la rejilla, y ésta queda sin influencia ninguna en la descarga. El arco subsiste, determinándose la intensidad de la corriente únicamente por la tensión impuesta y por la resistencia de la carga. La rejilla sólo puede volver a actuar si su envoltura de iones positivos desaparece; es decir, si la corriente en el thyratron se hace cero. En la corriente alterna esto tiene lugar, por sí mismo, cada semionda.

Pero si se emplean thyratrones con corriente continua, la corriente, una vez iniciada, sólo se puede volver a regular con la rejilla, interrumpiéndola antes momentáneamente con algún artificio externo. Es ésta una característica importante de los thyratrones, que los distingue de los plotrones, o tubos sin gas o vapor; el thyratron es un rectificador de arco, cuyo fun-

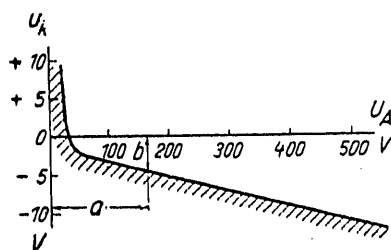


Fig. 9. Tensiones críticas de la rejilla en función de las tensiones de ánodo

cionamiento puede iniciarse a voluntad con la rejilla, pero que después de establecido el arco ya no puede la rejilla sola ni modularlo, ni limitarlo, ni extinguirlo. Claro está que empleando corriente alterna o interrumpiendo artificialmente el circuito en la continua se devuelven a las rejillas sus propiedades, consiguién-

dose, como veremos, resultados de regulación extraordinarios.

La relación entre la tensión crítica negativa de la rejilla, $-U_K$, para la que se produce el arco, y la tensión de ánodo antes de empezar éste, U_A , ha sido llamada por los norteamericanos *relación de regulación*¹ de la rejilla. Viene a ser la inversa del factor de amplificación de los amplificadores de tres electros. En algunos thyratrones esta relación es constante; pero, debido a diversos efectos secundarios, en la mayor parte de los casos sólo para valores elevados de U_A , existe una relación lineal entre U_A y $-U_K$. En la figura 9 puede verse, por ejemplo, la curva representativa de U_K en función de U_A , para un cierto tipo de convertidores de cátodo incandescente, de construcción A. E. G.

Es interesante comparar las curvas características de funcionamiento de un plotron con las de un thyratron². En el primero, la tensión U_A del arco crece con la intensidad de la corriente, I_A . En el caso de la figura 10-I, para 10 amperios, la tensión del

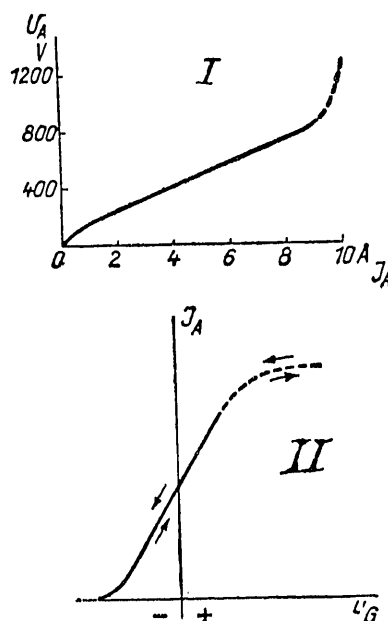


Fig. 10. Curvas características de un plotron

arco, de ánodo a cátodo, es, aproximadamente, de unos 1 000 V. Por otra parte (fig. 10-II), la intensidad I_A varía de un modo continuo y reversible con la tensión de la rejilla, U_G , aumentando al aumentar ésta, mientras no se llega a la saturación. En cambio, en el thyratron, el voltaje del arco, U_A , varía muy poco con la intensidad I_A , y es de un orden de magnitud cien veces inferior. En la característica dibujada (fig. 11-I) se ve, por ejemplo, que para 200 amperios U_A sólo vale unos 15 voltios. Esta diferencia de comportamiento procede, como ya sabemos, de la presencia del vapor de mercurio en el thyratron, que da lugar a un fenómeno de ionización y permite el paso de grandes intensidades con un voltaje U_A reducido. Por tanto, los tubos de cátodo incandescente y vapor de mercurio presentan, para la técnica de las corrientes fuertes, dos ventajas importantísimas, respecto a los de alto vacío: a), permiten el paso de intensidades

¹ HULL: "Hot-cathode thyratrons" (General Electric Ro., números 4 y 7, 1929).

² LAUB: Loc. cit.

grandes, y b), la caída de tensión y, por tanto, la pérdida de potencia es incomparablemente más reducida. La característica $J_A - U_G$ presenta también una forma peculiar en el thyatron, de acuerdo con lo que ya antes hemos dicho (fig. 11-II). Mientras U_G no llega a la tensión crítica U_K , la intensidad J_A es cero.

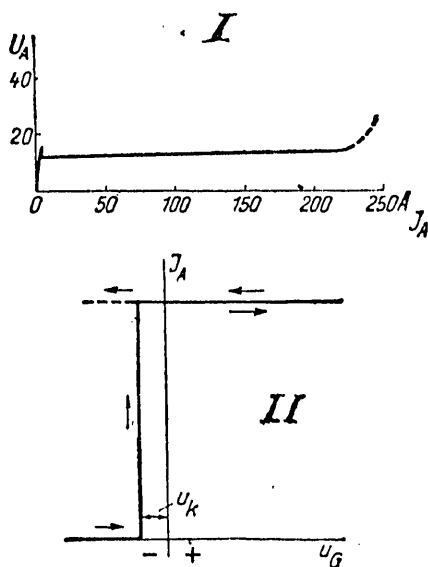


Fig. 11. Curvas características de un thyatron

Al llegar U_G al valor U_K , la intensidad toma de golpe el valor finito que corresponde a la tensión impuesta y a la resistencia de la carga, y esa intensidad permanece ya constante, aunque variemos U_G por encima o por debajo de U_K .

En los convertidores normales de vapor de mercurio con cátodo de mercurio, el funcionamiento de la rejilla es análogo al que acaba de explicarse. Para que el arco salte del cátodo a uno de los ánodos es necesario que el voltaje U_G de la rejilla correspondiente haya llegado al valor crítico U_K , función ésta, naturalmente, de la tensión instantánea U_A . Mientras sea $U_G < U_K$ el arco no puede iniciarse. Pero cuando ya ha empezado la descarga, la rejilla pierde toda influencia, mientras la intensidad del arco no pase por

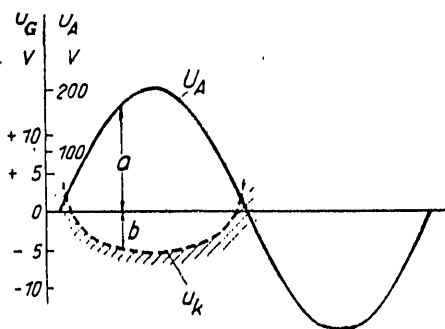


Fig. 12. Tensiones críticas cuando la tensión U_A es sinusoidal

cero y desaparezcan los iones positivos depositados sobre la rejilla. Como en estos convertidores la emisión de electrones se hace en la superficie de mercurio en la mancha incandescente en que termina el arco, estos electrones tienen que vencer el trabajo de emisión superficial. Por esta razón, la caída catódica de tensión es mayor que en los thyatrones, y, en conjunto, la tensión del arco, de ánodo a cátodo, es

de 20 a 30 V, en lugar de 12 a 15 V en los convertidores de cátodo incandescente.

Regulación con corriente alterna

Cuando la tensión U_A en el tubo es sinusoidal (figura 12), para cada valor instantáneo a de la misma existirá un voltaje crítico b de la rejilla. Llevando estos valores b como ordenadas sobre las abscisas de los U_A correspondientes se obtiene una cierta curva U_K (fig. 12). Si la tensión U_G de la rejilla varía en el tiempo, como U_A , mientras se mantenga por debajo de U_K , es decir, en el área rayada, el arco no se encenderá: el tubo estará cerrado para la corriente. Pero en cuanto la curva de variación de U_G corte a la curva U_K , el arco se establecerá, si en la semionda considerada es U_A positivo, y durará hasta la terminación de esa semionda. En las semiondas negativas de U_A el arco no puede existir, pues la corriente sólo puede circular del ánodo al cátodo, emisor de electrones, y, por tanto, el primero debe de estar a más

Disposición para variar la fase

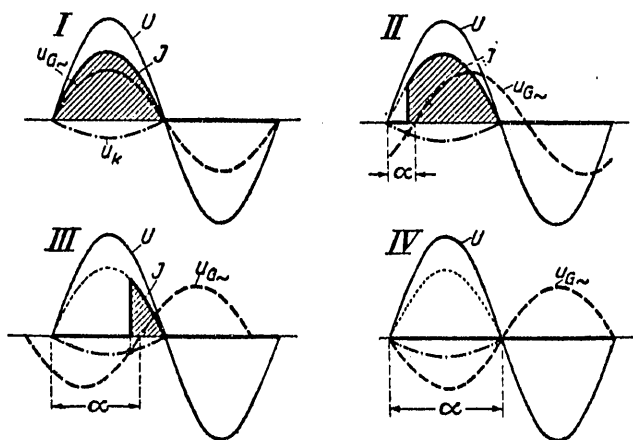
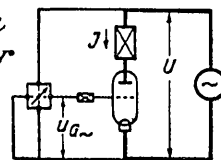


Fig. 13. Sistema de regulación, según Toulon, variando el ángulo de fase de U_G

alto potencial que el segundo para que haya un arco.

El ingeniero francés *Toulon* tuvo la idea, como ya hemos dicho, de crear entre la rejilla y el cátodo una tensión alterna sinusoidal, $U_G \sim$, siendo $U_G \sim$ de la misma frecuencia que la tensión principal U , y pudiéndose variar a voluntad la diferencia de fase entre $U_G \sim$ y U (fig. 13)¹. Si $U_G \sim$ está en fase con U , el tubo estará abierto para la descarga durante toda la semionda positiva de U , puesto que $U_G \sim > U_K$ (figura 13-I), y cerrado durante la semionda negativa de U . La corriente J tendrá la forma indicada en la figura 13-I (trazo grueso); será sinusoidal durante la primera semionda, y cero durante la segunda². Si se retrasa $U_G \sim$ un cierto ángulo α respecto a U (figura 13-II), el tubo estará cerrado para la corriente, mientras la curva $U_G \sim$ no corte a la curva U_K . A partir del instante de la intersección de estas curvas empieza el paso de la corriente, que variará como se

¹ LAUB: Loc. cit.

² Se supone carga no inductiva en la figura.

ve en la figura 13-II. Si aumenta el retraso α entre $U_C \sim$ y U (fig. 13-III), la corriente se iniciará más tarde, durando, como siempre, hasta el final del primer semiperíodo. Si se llega, por último, a tener $U_C \sim$ en oposición de fase respecto a U , siendo U_C mayor que U_K (fig. 13-II), el tubo estará cerrado para la corriente durante el primero y durante el segundo semiperíodo.

Como este proceso se repite luego idénticamente cada período, se comprende que el método de Toulon permite regular de un modo suave y continuo el valor medio o el valor eficaz de la corriente I , desde un máximo (I) hasta cero (IV).

La diferencia de fases entre $U_C \sim$ y U puede producirse de diversas maneras. Las más corrientes son dos: con un regulador de inducción o con una conexión especial, a modo de puente Wheatstone en corriente alterna. El regulador de inducción (fig. 14) se emplea cuando se dispone de corriente alterna trifásica. Variando la posición del rotor del regulador se puede cambiar la fase de $U_C \sim$ respecto a U , en los tres tubos, desde 0° hasta 360° . Cuando sólo se dispone de corriente monofásica puede utilizarse el esquema de la figura 15. Las dos mitades del secundario del transformador S_p-T están conectadas, respectivamente, a una resistencia R y a una reactancia, in-

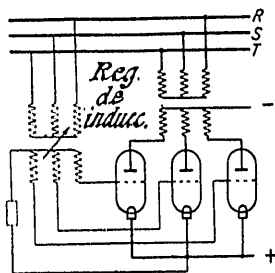


Fig. 14. Variación de la fase de las tensiones U_C con un regulador trifásico de inducción

ductiva, ωL , o capacitiva, $\omega \frac{1}{C}$ y el circuito rejilla-cátodo constituye la diagonal del puente. Variando la resistencia R o la reactancia (ωL o $\omega \frac{1}{C}$), es decir, la relación entre ambas, se hace que el extremo del vector representativo de la tensión U_C describa una

circunferencia, cuyo diámetro es U , pues U_R y U_L (o U_R y U_C) son perpendiculares. Al variar $\frac{R}{\omega L}$ de cero a ∞ varía el desfase retrasado de U_C desde 180° hasta cero. Si se emplean capacidades en el puente, al variar $\frac{R}{\omega C}$ desde cero hasta ∞ , varía el desfase adelantado de U_C desde 180° hasta cero ¹.

La corriente en el circuito cátodo-rejilla es, en to-

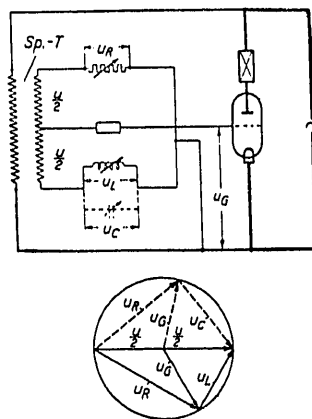


Fig. 15. Conexiones para variar la fase de U_C cuando la corriente es monofásica

dos los casos, muy pequeña. Cuando el tubo está cerrado esta corriente es esencialmente de capacidad. Durante el arco está determinada por la magnitud de $U_C \sim$ y por el valor, muy elevado, de una resistencia óhmica que se intercala en el circuito. Las potencias necesarias en el circuito de regulación resultan así ser pequeñísimas: desde $\frac{1}{1000} W$, en tubos muy pequeños, hasta unos $10 W$ en los mayores convertidores.

Pedro JOSE LUCIA
Ingeniero de Caminos

¹ Las figuras 4, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 y 15 están reproducidas del estudio ya citado del Dr. Laub: "Stromrichtern". La figura 3, del artículo del Dr. Glaser: "Quecksilberdampf-Gleichrichter mit Glühkathode" (E. T. Z., núm. 26, 1931), y las figuras 2, 5, 6 y 7, de la A. E. G. Zeitung, números 10, 1931, y 5, 1932. Cúmpleme manifestar a dichos señores y a la A. E. G. mi sincero agradecimiento por haber puesto a mi disposición tan interesantes originales.

Notas para un estudio de las crisis económicas

La lectura de varias obras recientes ¹ sobre cuestiones económicas me ha dado ocasión para tomar algunas notas, que me atrevo a dar a la publicidad, con la esperanza de que la actualidad de los proble-

¹ La mayor parte de los datos estadísticos indicados en este artículo proceden de las tres obras siguientes:

Recent economic changes in the United States: Mc. Graw-Hill Book Co. New York, 1928.

L'apogée du capitalisme, por Werner Sombart. Payot, París, 1932. Traducción del tercer tomo de *Das Kapitalismus*.

Le cours et les phases de la dépression économique mondiale: Sociedad de Naciones, Ginebra, 1931. Publicación, A. 22, 1931, II A, dirigida por el profesor Ohlin.

mas económicos compense su desorden y defectos.

Mi propósito, al preparar este trabajo, fué el de recoger los grandes rasgos de las profundas modificaciones que en la vida humana ha introducido el régimen industrial, concediendo especial atención a las crisis económicas, que constituyen una de sus manifestaciones más características.

Orígenes del régimen industrial

Aunque la continuidad de la historia dificulta la separación de unas y otras épocas de la vida huma-