

C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
Nº 1	AÑO 1954

09.54.01

REPUBLICA ARGENTINA

PUBLICACIONES

DE LA

COMISION NACIONAL DE LA ENERGIA ATOMICA

MISCELANEA

Nº 1

FUNCIONAMIENTO DE UN GENERADOR
EN CASCADAS DE ALTA TENSION

Por E. J. BERTOMEU y C. A. MALLMANN

BUENOS AIRES

1954

E. J. BERTOMEU y C. A. MALLMANN

**FUNCIONAMIENTO DE UN GENERADOR
EN CASCADAS DE ALTA TENSION**

BUENOS AIRES

1954

FUNCIONAMIENTO DE UN GENERADOR EN CASCADAS DE ALTA TENSION

por E. J. BERTOMEU y C. A. MALLMANN

SUMMARY. — We give the theory of a High Tension Cascade Generator developing the general formulae to calculate the voltage drop and ripple. We consider the particular case of an instrument which uses mercury vapour rectifiers taking in account the advantages and disadvantages of these and other types of rectifiers.

1. *Consideraciones generales.*

Existen muchas descripciones de los principios de operación y aplicaciones de los generadores en cascadas del tipo Greinacher. Creemos no obstante que es importante dar una reseña algo más detallada de tal instrumento para el caso en que se lo utilice con válvulas rectificadoras de vapor de mercurio. Además, consideramos de utilidad comparar el funcionamiento de las rectificadoras a vapor de mercurio con las de alto vacío y de selenio.

En los generadores de alta tensión que construye la casa Philips se recurre a la rectificación con válvulas a vapor de mercurio.

2. *Funcionamiento del generador sin carga.*

Para mayor claridad, comenzaremos estudiando el funcionamiento del generador sin carga, cosa que en la práctica nunca sucede. Esto se debe a que, aunque no se tome corriente del generador siempre hay una descarga debido al efecto corona.

La figura (1) muestra esquemáticamente las conexiones de un generador en cascadas de siete etapas a la cual nos referiremos para facilitar la descripción.

Consideremos primeramente el circuito $a_0 a'_0 a'_1$. Entre a_0 y a'_0 está conectado el secundario del transformador de alta tensión. El par de condensadores en derivación C''_7 y C'''_7 será considerado hasta nuevo aviso como un solo condensador y designado con C'_7 .

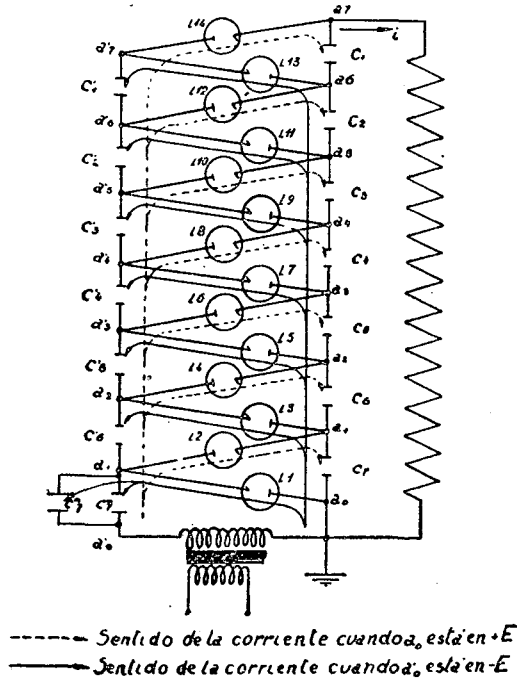


Figura 1. — Diagrama de conexiones de un generador en cascadas de siete etapas.

En a_0 la tensión es constantemente nula y en a'_0 varía entre $+E$ y $-E$ indicando con E la amplitud de la salida del transformador de alimentación. El condensador C'_7 se carga de tal manera que entre a'_1 y a'_0 hay constantemente una diferencia de potencial $+E$. El proceso de carga tiene lugar cuando a'_0 es negativo respecto de a_0 y por tanto la rectificadora L_1 conduce.

Dada la variación del potencial en a'_0 , el potencial de a'_1 respecto de a_0 debe variar entre $+2E$ y 0 . Puede observarse

en la figura (2) la marcha del potencial en los puntos a_0, a'_0 , y a'_1 y las correspondientes diferencias de tensión entre ellos una vez alcanzado el estado estacionario.

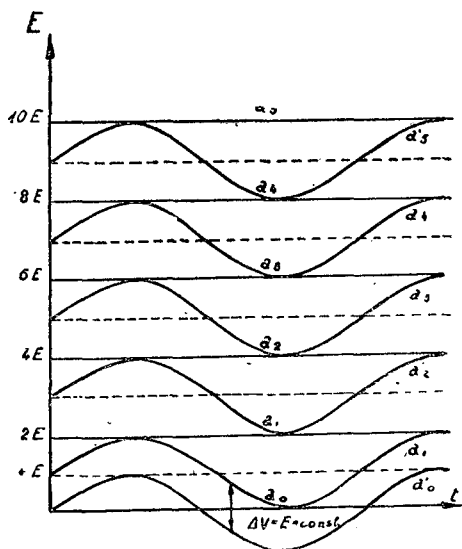


Figura 2. — Marcha del potencial en una serie de puntos del generador en cascadas.

Si la rectificadora L_1 se invierte el proceso ocurre en forma opuesta puesto que el condensador C'_7 se carga de manera tal que entre a'_1 y a_0 hay una diferencia de potencial constante de valor $-E$.

Pasemos ahora al circuito $a_0 a'_1 a_1$. Ahora la diferencia variable de potencial entre a'_1 y a_0 actúa en C_7 como antes ocurrió con la diferencia de potencial existente entre a'_0 y a_0 respecto del condensador C'_7 .

Por tanto el condensador C_7 , se carga de tal manera que entre a_1 y a_0 existe una diferencia de potencial constante igual a $+2E$ (ver figura (2)).

Análogamente, entre a'_2 y a'_1 hay una diferencia de potencial constantemente igual a $+2E$ y por consiguiente, el potencial de a'_2 varía en la forma indicada en la figura (2).

Resultará entonces, que en a_2 habrá una diferencia de potencial constante respecto de a_1 , igual a $+2E$ y respecto de a_0 igual a $+4E$.

Así sucesivamente, puede observarse que en los puntos $a'_0, a'_1, a'_2, \dots, a'_7$ los potenciales son todos variables mientras que, en $a_0, a_1, a_2, \dots, a_7$ todos son constantes.

Es interesante observar que todas las rectificadoras y condensadores deben soportar una tensión máxima igual a $2E$ salvo el condensador C_7' para el cual la tensión no pasa de E .

Alcanzado el estado estacionario en que todos los condensadores están cargados, y siempre en el caso ideal del funcionamiento del generador sin carga las rectificadoras dejan de conducir. A esta conclusión se llega, observando la polarización de los electrodos en la figura mencionada.

Designando cada circuito análogo al $a_0 a'_0 a'_1 a_1$, mediante el cual se logra transformar la tensión alterna de amplitud E en continua de tensión $2E$, como una etapa del generador, la tensión nominal será naturalmente igual a $2nE$ donde n es el número de etapas.

La distribución geométrica para el montaje mecánico del generador resulta sumamente análoga a la del esquema (1), por la razón de que se logra de tal manera una distribución muy regular de los potenciales, a lo largo de ambas columnas.

3. Funcionamiento del generador con carga.

Si en el punto a_7 se extrae una corriente de intensidad i (que será la suma de la corriente de drenaje, más la corriente debida al efecto corona mas la eventual de una resistencia para la medida de la alta tensión) proveniente de la descarga de $C_1, C_2, \dots, C_7$, caerá la tensión en los puntos $a_0, a_1, \dots, a_7$.

Debido a la caída de potencial en tales puntos, y en el semiperíodo en que a'_0 es positivo respecto de a_0 , en los puntos $a'_7, a'_6, a'_5, \dots, a'_1$ habrá una polarización positiva creciente respecto de los puntos homólogos $a_7, a_6, a_5, \dots, a_1$.

Tal polarización tiene lugar en un breve intervalo del semiperíodo considerado cosa que puede observarse bien en la figura (3).

Cuando tal polarización alcanza la tensión de ignición de las válvulas rectificadoras, se inicia la circulación de corriente a través de las válvulas $L_{14}-_{12}-\dots-L_2$ en la forma indicada por las flechas segmentadas.

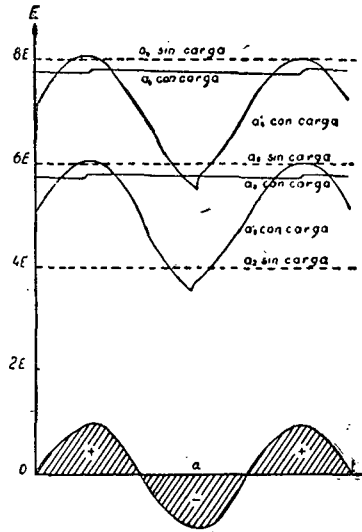


Figura 3. - Marcha del potencial en algunos puntos del generador en cascadas funcionando con carga.

De tal manera se repone en los condensadores $C_1, C_2, \dots, C_7$ la carga perdida hasta que se igualan los potenciales entre los pares de puntos $a_7-a'_7$; $a_6-a'_6$; ...; $a_1-a'_1$.

Esta reposición de carga se hace a expensas de las cargas de $C'_1, C'_2, \dots, C'_7$. La carga entregada por estos condensadores hace disminuir los valores instantáneos del potencial en los puntos $a'_1, a'_2, \dots, a'_7$. En el semiperíodo en que a'_0 es negativo respecto de a_0 , las polarizaciones entre los puntos $a'_6-a'_7$; $a_5-a'_6$; ...; $a_0-a'_1$ son positivas crecientes.

Cuando esta polarización alcanza la tensión de ignición, las rectificadoras $L_{13}-_{11}-\dots-1$ comienzan a conducir corriente en los sentidos indicados por las flechas llenas.

Se repone así la carga perdida por los condensadores $C'_1, C'_2, \dots, C'_7$, hasta que se igualan los potenciales entre los pares de puntos $a_6-a'_7$; $a_5-a'_6$; ...; $a_0-a'_1$.

Puede observarse en la figura (3) el corto instante dentro

del período de la corriente alterna del transformador, durante el cual tiene lugar este proceso. Debe observarse aquí que la figura (3) da una idea de la marcha de los potenciales, pero no corresponde a una determinación experimental.

En la figura (4) se ha representado la marcha de la corriente entre a_7 y a_6 .

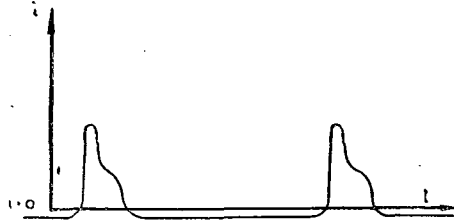


Figura 4. — Marcha de la corriente entre a_7 y a_6

Puede verse allí, bajo la línea $i=0$ la corriente de descarga de los condensadores $C_1, C_2, \dots, C_7$ de valor prácticamente constante, porque la carga entregada durante un período es muy pequeña respecto de la carga total de los condensadores. Los picos que se observan sobre la línea $i=0$ corresponden a los ciclos de reposición de carga.

La carga entregada en a_7 en un período es $: i/f$ donde f es la frecuencia del generador que alimenta el transformador.

Ya se vió como se reponía en un semiperíodo, tal carga a los condensadores $C_j (j=1, 2, \dots, 7)$ la cual según puede verse en la figura (1) (flechas segmentadas) debe pasar en tal semiperíodo, una vez por el condensador C'_1 , dos veces por C'_2 , y así sucesivamente siete veces por C'_7 en nuestro caso.

Análogamente en el semiperíodo de carga de los condensadores $C_j' (j=1, 2, \dots, 7)$ la misma carga pasa una, dos, ..., siete veces respectivamente por los condensadores $C_1, C_2, \dots, C_7$ (flechas llenas).

Tenemos ahora dos efectos a estudiar:

4. Caída de potencial. (Caída de tensión entre a_7 y a_0).

Esta estará dada por

$$\Delta V = V_{\text{nominal}} - V_{\text{con carga}}.$$

La calcularemos para el caso de n etapas. El condensador C'_n (C'_7 en nuestro caso) no disminuirá su tensión máxima.

Por tanto en el punto a'_1 , la tensión máxima será: $2E$
la disminución de tensión máxima en el condensador C'_{n-1} será:

$$\frac{ni}{f} \left[\frac{1}{C'_n} + \frac{1}{C_n} \right].$$

La tensión máxima en el punto a'_2 resultará:

$$4E - \frac{i}{f} \left[\frac{n}{C'_n} + \frac{n}{C_n} \right]$$

Generalizando, la disminución de tensión máxima en el condensador C'_{n-k} es de la forma:

$$\begin{aligned} \frac{i}{f} \left[n \left(\frac{1}{C'_n} + \frac{1}{C_n} \right) + (n-1) \left(\frac{1}{C'_{n-1}} + \frac{1}{C_{n-1}} \right) + \right. \\ \left. + \dots + (n-k+1) \left(\frac{1}{C'_{n-k+1}} + \frac{1}{C_{n-k+1}} \right) \right]. \end{aligned}$$

Fórmulas que pueden simplificarse para los casos prácticos que se presentan, que son:

$$\text{I)} \quad C_1 = C'_1 = C_2 = C'_2 = \dots = C_n = C'_n$$

$$\text{II)} \quad C_n = n C_1 = n C'_1 = C'_n$$

$$C_{n-1} = (n-1) C_1 = (n-1) C'_1 = C'_{n-1}$$

.....

$$\text{III)} \quad C_1 = C'_1 = C_2 = \dots = C_n$$

$$C'_n = M C_1 (M > 1).$$

El último caso es el que se da en el generador Philips, re-

sultando en consecuencia como expresión general de las caídas de tensión máxima en el condensador C'_{n-k} :

$$\frac{i}{fC_1} \left[n \left(\frac{1}{M} + n \right) - (n-k)(n-k+1) \right].$$

En forma similar, pueden generalizarse las expresiones de las tensiones en los puntos a_k ($k=0, 1, \dots, n$) que veremos primeiramente para el caso general en que todos los C_{n-k} y los C'_{n-k} son distintos. Resultará en:

$$\begin{aligned} a_0 \quad V_0 &= 0 \\ a_1 \quad V_1 &= 2E - \frac{ni}{fC'_n} \\ a_2 \quad V_2 &= 4E - \frac{i}{f} \left[\frac{2n}{C'_n} + \frac{n-1}{C'_{n-1}} + \frac{n}{C_n} \right] \\ a_3 \quad V_3 &= 6E - \frac{i}{f} \left[\frac{3n}{C'_n} + \frac{2(n-1)}{C'_{n-1}} + \frac{n-2}{C'_{n-2}} + \frac{2n}{C_n} + \frac{n-1}{C_{n-1}} \right] \\ \dots \dots \dots \\ a_k \quad V_k &= 2kE - \frac{i}{f} \left[\frac{kn}{C'_n} + \frac{(k-1)(n-1)}{C'_{n-1}} + \dots + \frac{n-k+1}{C'_{n-k+1}} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{(k-1)n}{C_n} + \frac{(k-2)(n-1)}{C_{n-1}} + \dots + \frac{n-k+2}{C_{n-k+2}} \right] \\ \dots \dots \dots \end{aligned}$$

Así en el punto n -ésimo es:

$$\begin{aligned} V_n &= 2nE - \frac{i}{f} \left[\frac{n^2}{C'_n} + \frac{(n-1)^2}{C'_{n-1}} + \dots + \frac{1}{C'_1} + \frac{(n-1)n}{C_n} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{(n-2)(n-1)}{C_{n-1}} + \dots + \frac{2}{C_2} \right]. \end{aligned}$$

En particular, para el caso (III) resulta:

$$V_n = 2nE - \frac{i}{fC_n} \left[\frac{2}{3}n^3 + n^2 \left(\frac{1}{M} - \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{6}n \right]. \quad (1)$$

Siendo $M=2$ puede ponerse con suficiente aproximación:

$$V_n = 2nE \frac{2}{3} \frac{i n^3}{fC}. \quad (2)$$

Es esta la razón para que el condensador C'_7 esté compuesto por los condensadores en paralelo que se indican en la Figura (1).

5. «Ripple».

Este es debido al proceso discontinuo en la reposición de carga en los condensadores C_{n-k} .

Puede tenerse su valor, haciendo la suma de los «ripples» en los puntos a_k . Cada «ripple» parcial estará dado por

$$\delta V_k = \frac{i(n-k+1)}{fC_{n-k+1}}$$

puesto que por el condensador C_{n-k+1} debe reponerse una carga

$$\frac{(n-k+1)i}{f}.$$

Para las primeras etapas tendríamos, en nuestro caso

$$\delta V_1 = \frac{7i}{fC_7} = \frac{7i}{fC_1}$$

$$\delta V_2 = \frac{6i}{fC_1}$$

.....

$$\delta V_7 = \frac{i}{fC_1}.$$

Puede observarse que la contribución al «ripple» de cada condensador, es directamente proporcional al número de etapas más uno, que tiene por encima suyo. Esto sugiere, aumentar las capacidades en forma tal, que la contribución de todos los con-

densadores sea igual a la mínima de ellas. Tal es la idea del caso II) para el cual resultará:

$$\delta V = \frac{ni}{fC_1}.$$

No solo se gana así en la disminución del «ripple» sino también en el aumento de V_n . En efecto será ahora este último:

$$V_n = 2nE - \frac{i}{f} \frac{n^2}{C_1}.$$

En un instrumento con siete etapas, adoptando tal disposición, podrían disminuirse el «ripple» y la caída de potencial en un factor cuatro.

Esto no ha sido hecho en el generador Philips en el cual, se ha aumentado la capacidad C_7 , procedimiento con el que se consigue mejorar algo las cosas en lo que respecta al potencial máximo, porque de esta manera se anulan prácticamente los términos en n^2 en la expresión (1).

El «ripple» total resultará, para el caso general:

$$\delta V = \sum_{k=1}^n \delta V_k = \frac{i}{f} \sum_{k=1}^n \frac{n-k+1}{C_{n-k+1}} = \frac{i}{f} \sum_{1}^n \frac{n}{C_n}.$$

En nuestro caso. (III) y en el caso I resulta:

$$\delta V = \frac{i}{2f} \frac{n(n+1)}{C_1}. \quad (3)$$

En la figura (3) puede observarse la deformación introducida en las tensiones constantes por el «ripple».

Las variaciones del potencial total del generador fluctuarán por consiguiente entre:

$$V_{\text{máximo}} = 2nE - \Delta V$$

$$V_{\text{mínimo}} = 2nE - \Delta V - \delta V$$

que para nuestro caso y el I deben ponerse

$$V_{\text{máx}} = 2nE - \frac{2}{3} \frac{in^3}{fC_1}; \quad V_{\text{mín}} = 2nE - \frac{2}{3} \frac{in^3}{fC_1} - \frac{i(n+1)}{2fC_1}.$$

Aumentando el número de etapas, aumentan simultáneamente la tensión nominal y la caída de tensión. Debe buscarse entonces el número de etapas óptimo. La condición es:

$$\frac{dV_{\text{máximo}}}{dn} = 2E - \frac{2in^2}{fC_1} = 0$$

de donde

$$n = \sqrt{\frac{i}{EfC_1}}.$$

Que en el caso de un generador Philips ($E = 10^5$ Volts; $f = 200$ c/s.; $C_1 = 1,8 \cdot 10^{-8}$ F.; $i = 3$ mampères) resulta:

$$n = 11.$$

La caída de tensión y el ripple, por miliampere, en el mismo caso resultarán:

$$\frac{\Delta V}{i} = 63 \frac{kV}{mA}; \quad \frac{\delta V}{i} = 7,8 \frac{kV}{mA}.$$

Puede reducirse el «ripple» mediante el agregado de un sistema de filtro consistente en una resistencia y capacidad. En el caso del mencionado instrumento se logra reducir el «ripple» en un factor 15 mediante una resistencia de 7 Mohm y siete capacidades en serie de $1,8 \cdot 10^{-8}$ F, cada una.

6. Algunas consideraciones sobre las rectificadoras.

Las características principales de las rectificadoras deben ser:

- I) requerir un bajo (o mejor ninguno) potencial de ignición.
- II) tener baja resistencia interna.
- III) requerir pequeña energía para calefacción de los filamentos.

IV) bloquear tensión lo más elevada posible.

V) tener vida lo más larga posible.

La condición primera es importante para el proceso de reposición de cargas en los condensadores C_j y C'_j . Puede verse que si el potencial de ignición de las rectificadoras es demasiado elevado, no todos los ciclos serían eficaces para el proceso de recarga. En efecto, observando la figura (3) puede advertirse, en los ciclos positivos, que la diferencia de tensión máxima entre dos puntos tales como a_4 con carga y a'_4 con carga como ejemplo, podría ser inferior al potencial de ignición, en cuyo caso la descarga continuaría hasta el próximo ciclo. Cosa análoga sucedería con las diferencias de tensión entre a'_4 con carga y a_3 con carga en los ciclos negativos.

La condición de que la resistencia interna sea baja es importante porque: siendo grande la conductividad es posible la reposición de carga a los condensadores mencionados, en el breve tiempo que ello ocurre y, siendo pequeña la caída de tensión, prácticamente se igualan los potenciales de los condensadores.

La condición de que los filamentos requieran baja energía es necesaria para la simplificación del problema de suministrarles la corriente de calefacción, dado que se encuentran a alto potencial.

Es evidente que de no cumplirse la cuarta condición, para lograr tensiones elevadas sería necesario aumentar el número de etapas, con el consiguiente aumento de la caída de tensión y «ripple».

En cuanto a las rectificadoras a utilizarse existen las tres posibilidades siguientes:

- I) válvulas que funcionan con atmósfera de vapor de mercurio;
- II) válvulas al vacío;
- III) rectificadores de selenio.

Las rectificadoras con vapor de mercurio presentan la ventaja de requerir bajo consumo para la calefacción de su filamento y pequeña resistencia interna. En cambio, tienen un po-

tencial de ignición bastante elevado y presentan el problema de que la estabilidad de su funcionamiento depende muy críticamente de la temperatura. Por esta última razón se recomienda termostatar todo el generador en cascadas para operar con tales válvulas.

Las rectificadoras del generador Philips consumen 8 watts en filamento, necesitan 7KV,* para su ignición y toleran hasta una carga de un ampere.

Con respecto a la carga máxima a que se puede someter a tales válvulas, debe observarse que el proceso de reposición de cargas (ver figura (3)) es sumamente breve, y por consiguiente durante su transcurso debe circular una elevada corriente.

Las rectificadoras al vacío no presentan problemas en cuanto a la ignición y temperatura de operación. Su vida es aproximadamente de mil horas como en las rectificadoras de vapor de mercurio. En cambio requieren una potencia elevada para la calefacción de su filamento. Por esta última razón no es posible suministrar la energía a los filamentos, mediante radiofrecuencia como se hace en el generador Philips. En general se utilizan para este propósito electrogeneradores ubicados en una de las columnas divisoras de tensión del instrumento. Su resistencia interna es superior a la de las rectificadoras de mercurio.

Prácticamente todos los generadores en cascadas que no han sido fabricados por Philips utilizan válvulas al vacío.

Por fin están los rectificadores de selenio que presentan además de las ventajas de las rectificadoras al vacío la de que tienen vida prácticamente ilimitada y no requieren consumo de energía de filamentos. La desventaja que presentan es que su bloqueo no es tan bueno como el de las válvulas anteriormente mencionadas. Existe siempre una corriente opuesta a la de trabajo que tiene por efecto aumentar la descarga de los condensadores y por consiguiente aumentar el «ripple».

Se advierte actualmente una gran tendencia a reemplazar válvulas por rectificadores de selenio. En particular en el «Laboratoire de Synthèse Atomique», «Ivry (Seine)» se está utilizando un generador en cascadas construido originalmente para válvulas «Kenotrones» por Müller en Alemania, con rectificadores de selenio desde hace tres años, sin ninguna clase de inconvenientes.

B I B L I O G R A F I A

- 1) BOUWERS, *Elektrische Höchstspannungen*.
- 2) BOUWERS y KÜNTKE, *Ein Generator für drei Millionen Volt Gleichspannung*. Zeitschrift für Physik., Nº 8, pág. 27, 1937.
- 3) BOUWERS y HEIJN, *Philips Technical Review* 6, Nº 2, 46. An apparatus for the transmutation of the atomic Nuclei.
- 4) BOUWERS, HEIJN y KUNTKE, *A neutron generator*, *Physica* 4, 153.
- 5) BURCHAM, *The one million volt accelerating equipment of the Cavendish Laboratory*. Cambridge, Nature, 160, 316.
- 6) JELLY, *The Million Volt H. T. Accelerator at the Cavendish Laboratory*. Cambridge, *Atomics* 3, Nº 3, pág. 61.
- 7) GRADSTEIN, *A modern high voltage equipment*, compiled by Philips Technical review 1, Nº 1, 6.