

C. N. E. A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
Nº 2	AÑO 1968

00.68.02

EN - 5/11

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION
GERENCIA DE ENERGIA

TRANSFORMACION Y APROVECHAMIENTO DE LA ENERGIA ISOTOPICA

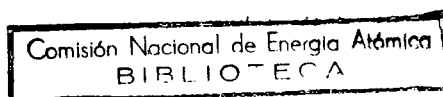
- REVISION DE LAS TECNICAS EMPLEADAS -

Antonio C. Castagnet

Servicio de Aplicación Industrial - Departamento de Aplicación

Buenos Aires - Diciembre 1968

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION
GERENCIA DE ENERGIA



TRANSFORMACION Y APROVECHAMIENTO DE LA ENERGIA ISOTOPICA

- REVISION DE LAS TECNICAS EMPLEADAS -

Antonio C. Castagnet

Servicio de Aplicación Industrial - Departamento de Aplicación

Buenos Aires - Diciembre 1968

CONTENIDO

<u>SECCION</u>	<u>PAG.</u>
1.0.0	LOS RADIOISOTOPOS COMO FUENTES DE ENERGIA 2
2.0.0	ACTIVACION DE COMPUESTOS LUMINISCENTES 6
2.1.0	MECANISMOS DE LA LUMINISCENCIA 6
2.2.0	COMPUESTOS AUTOLUMINISCENTES 10
3.0.0	BATERIAS NUCLEARES 16
3.1.0	TRANSFERENCIA DIRECTA DE CARGAS 16
3.2.0	IONIZACION Y EXCITACION 19
4.0.0	GENERADORES ISOTOPICOS 19
4.1.0	FUENTES DE CALOR 19
4.2.0	CONVERSION DE ENERGIA 21
4.3.0	APLICACIONES DE LOS GENERADORES ISOTOPICOS 24

NOTA: Ilustraciones y gráficos al final del texto.

RESUMEN

En el presente informe se analiza la capacidad energética de las fuentes radiactivas, y se describen los dispositivos para utilizar dicha energía con fines prácticos, mediante su transformación en potencia eléctrica o en luz visible, citándose las aplicaciones más importantes.

Para ello se ha recopilado y reseñado información de diferentes publicaciones (que se mencionan en la bibliografía anexa), ordenándola racionalmente con el propósito de obtener una versión comprensible y global del tema, incluyendo el tratamiento simplificado de los mecanismos por los cuales se efectúa, en cada caso, la transformación de la energía isotópica.

1.0.0 LOS RADIOISOTOPOS COMO FUENTES DE ENERGIA

La radiactividad lleva asociado un proceso de liberación de energía a lo largo del tiempo.

Originariamente, esa energía se halla distribuida entre todos los átomos inestables de la fuente radiactiva. Por lo tanto, la energía potencial almacenada en un "combustible isotópico", vendrá dada por la suma de las energías que cada átomo radiactivo individualmente, habrá de liberar durante su decaimiento.

A su vez, la potencia disponible en un instante dado, se expresará por medio de la velocidad a la cual la energía es cedida por los núcleos que se transforman.

Desde el punto de vista energético, interesan las siguientes propiedades de la radiación nuclear:

- 1) la energía se libera en cantidades discretas, por cada desintegración;
- 2) esa energía puede manifestarse como energía cinética de partículas o energía electromagnética de fotones;
- 3) la radiación tiene poder ionizante;
- 4) la emisión de partículas alfa y/o beta, implica la transferencia de cargas eléctricas.

A través de los múltiples procesos de interacción, la radiación cede su energía al medio dentro del cual se propaga. Cada vez que una partícula o un fotón interactúan con la materia, le transfieren parte o el total de su energía, - cinética en un caso, electromagnética en el otro -, provocándole un cambio en sus condiciones anteriores de equilibrio.

La materia puede almacenar en forma permanente la energía absorbida, (alteraciones en la estructura físico-química del medio) o, lo que es más usual, devolverla en forma más o menos rápida, radiándola al exterior. En este último caso la energía puede ser cedida en la forma de calor y también como radiación electromagnética. Ambos tipos, como se verá, son utilizables con fines prácticos, (en la construcción de generadores isotópicos y la producción de compuestos autoluminiscentes).

También la transferencia de cargas eléctricas, en el caso de la radiación de partículas, puede ser otra fuente de energía aprovechable, a través de la diferencia de potencial eléctrico resultante entre los electrodos emisor y colector de cargas.

Antes de estudiar en detalle los sistemas de aprovechamiento de la energía isotópica, definiremos matemáticamente la capacidad energética de las fuentes radiactivas.

Si A_0 desintegraciones por segundo (d/s) es la actividad de una fuente en el instante t_0 , la actividad A al tiempo $t > t_0$ será:

$$A = A_0 e^{-\lambda (t-t_0)} \quad \text{d/s} \quad (1.1)$$

donde:

λ , constante de decaimiento o desintegración, medida en unidades inversas a las de t y t_0 (unidades de tiempo)⁻¹.

Haciendo por comodidad

$$t_0 = 0$$

y expresando la constante de decaimiento λ en función del período de semidesintegración T :

$$\lambda = \frac{0,693}{T} \quad (\text{unidades de tiempo})^{-1}$$

la ec. (1.1) queda:

$$A = A_0 e^{-0,693 t/T} \quad \text{d/s} \quad (1.2)$$

(T y t se miden en las mismas unidades de tiempo).

Independientemente del tipo de radiación emitida, a cada desintegración corresponderá una energía promedio:

$$E_m \quad \frac{\text{MeV}}{\text{d}}$$

que es característica de cada radioisótopo.

La potencia W de una fuente será:

$$W = A \cdot E_m \quad \frac{\text{MeV}}{\text{s}}$$
$$W = A_0 E_m e^{-0,693 t/T} \quad \frac{\text{MeV}}{\text{s}} \quad (1.3)$$

y variará con el tiempo en la misma forma que la actividad (decrecerá exponencialmente).

La ec. (1.3) se puede expresar en watt ya que:

$$1 \quad \frac{\text{MeV}}{\text{s}} = 1,602 \times 10^{-13} \quad \text{watt}$$

Para dar una idea del orden de la potencia disponible con radioisótopos, supongamos que tenemos una fuente de un curie, con una energía promedio por desintegración,

de 1 MeV.

$$W = 3,7 \times 10^{10} \frac{d}{s} \cdot 1 \frac{\text{MeV}}{d} \quad \text{MeV/s}$$

$$W = 3,7 \times 10^{10} \times 1,602 \times 10^{-13} \text{ watt}$$

$$W = 6 \times 10^{-3} \text{ watt}$$

Se necesitarían entonces unos 170 curie del tal radioisótopo, para obtener 1 watt de potencia entregada por la fuente.

La energía total E liberada por la fuente durante el transcurso del tiempo t, será igual al número N de desintegraciones ocurridas en ese tiempo, multiplicado por la energía promedio de cada desintegración:

$$E = N \times E_m \quad \text{MeV} \tag{1.4}$$

$$1 \text{ MeV} = 1,602 \times 10^{-13} \text{ W.s}$$

Como la frecuencia media de desintegración (actividad de la fuente) no es constante en el tiempo, sino que decrece de acuerdo a la conocida ley exponencial, el número total de desintegraciones ocurrido durante un intervalo dado, deberá calcularse con el recurso del análisis matemático.

Sea A la actividad de la fuente al tiempo t:

$$A = \frac{dN}{dt} = A_0 e^{-\lambda t} \quad d/s \tag{1.5}$$

(para simplificar hemos supuesto en ec. (1.1) $t_0 = 0$).

La representación gráfica de ec. (1.5) nos da una curva del tipo indicado en la Fig.1.

Si dividimos el eje del tiempo en pequeños intervalos iguales Δt_i , podremos suponer que la correspondiente actividad A_i se mantiene constante durante ese intervalo. El producto:

$$A_i \frac{d}{s} \cdot \Delta t_i \text{ s} = \Delta N_i \quad d$$

nos dará el número total ΔN_i de desintegraciones ocurridas en el pequeño intervalo Δt_i .

Sumando todos los ΔN_i obtenidos para cada uno de los intervalos Δt_i en que hemos dividido el tiempo t, tendremos el valor buscado de N.

$$N = \Delta N_1 + \Delta N_2 + \dots + \Delta N_n = \Delta t_1 A_1 + \Delta t_2 A_2 + \dots + \Delta t_n A_n$$

que se suele indicar como

$$N = \sum_{i=1}^{i=n} \Delta t_i A_i$$

El valor de esta suma podría hallarse gráficamente y sería igual a la superficie de la curva de la Fig. 1.1 comprendida entre 0 y t.

El cálculo integral nos permite hacer lo mismo analíticamente.

De la ec. (1.5)

$$dN = A_0 e^{-\lambda t} dt \quad d$$

$$N = \int_0^t A_0 e^{-\lambda t} dt = \frac{A_0}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) \quad d \quad (1.6)$$

$$E = E_m \frac{A_0}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) \quad \text{MeV} \quad (1.7)$$

Si $t = T$, como $\lambda = \frac{0,693}{T}$

$$N = \frac{A_0 T}{0,693} \cdot \frac{1}{2} \quad \text{desintegraciones}$$

Para $A_0 = 1 \text{ c} = 3,7 \times 10^{10} \quad \text{d/s}$

$T = 30 \text{ años} \simeq 9,5 \times 10^8 \text{ s}$

$$N = \frac{3,7 \times 10^{10} \times 9,5 \times 10^8}{1,39} = 2,5 \times 10^{19} \quad \text{desintegraciones}$$

Si la energía media por desintegración es:

$$E_m = \frac{1 \text{ MeV}}{d} = 1,6 \times 10^{-13} \frac{\text{wattsegundo}}{\text{desintegración}}$$

la energía liberada por esa fuente de 1 curie al cabo de un período de semidesintegración de 30 años será

$$E_T = 2,5 \times 10^{19} \times 1,6 \times 10^{-13} = 4 \times 10^6 \quad \text{W} \cdot \text{s}$$

O para expresarla en unidades más familiares

$$E_T = \frac{4 \times 10^6}{10^3 \times 3.600} \quad \text{kW} \cdot \text{h}$$

$$E_T \approx 1,1 \cdot \text{kW} \cdot \text{h}$$

Las dos ecuaciones vistas, la de la potencia en cualquier instante, ec. (1.3) y la de la energía liberada durante el transcurso del tiempo, ec. (1.7), definen las características energéticas de las fuentes radiactivas.

En la práctica, conocido el rendimiento total del sistema de transformación de la energía isotópica en la energía que queremos obtener (eléctrica, mecánica, lumínica, etc), bastará con la ec. (1.3) para determinar la actividad inicial que deberá tener la fuente para asegurar el funcionamiento del sistema, durante un tiempo t preestablecido. Si $W_{mín}$ es el requerimiento mínimo de la potencia útil que debe entregar el sistema y n la eficiencia de conversión, la actividad mínima inicial de la fuente será:

$$A_0 \text{ mín} = \frac{W_{mín}}{n \cdot E_m e^{-0,693 t/T}} \quad c$$

2.0.0 ACTIVACION DE COMPUESTOS LUMINISCENTES

Se denominan compuestos luminiscentes a los materiales que, absorbiendo energía exterior, tienen la propiedad de emitir luz, -usualmente en la parte visible del espectro-, por mecanismos distintos a la incandescencia y a la reflexión.

El aspecto distintivo de este proceso de conversión de energía, es que tiene lugar sin un aumento apreciable de la temperatura del material. De hecho, puede existir luminiscencia con alto rendimiento, a temperaturas bien por debajo de aquellas a las cuales no podría observarse ni aún el más leve destello de incandescencia. De aquí el término de "luz fría", comunmente aplicado a los distintos tipos de luminiscencia.

2.1.0 MECANISMOS DE LA LUMINISCENCIA

Fundamentalmente la luminiscencia es un proceso simple. Consideremos un átomo de hidrógeno: A la temperatura ordinaria su único electrón estará en el estado de mínima energía, lo cual puede entenderse como que el electrón viaja alrededor del núcleo en su órbita más pequeña. Este nivel de energía inferior se denomina primer estado del electrón.

Si el átomo es excitado, digamos por haber absorbido un fotón de luz proveniente de una fuente externa, el electrón será impulsado a un nivel o estado de energía superior, representable por una órbita más alejada del núcleo.

Tal estado excitado es inestable, y después de un corto tiempo, el electrón, sin ningún estímulo externo, caerá al primer estado, liberando un fotón cuya energía es igual a la absorbida en el proceso de excitación. Este mecanismo está representado en la Fig.2.

Si las cosas son tan simples, cabe preguntarse porqué solo unos pocos objetos naturales son luminiscentes. La respuesta es que la materia no está compuesta de átomos

tan aislados unos de otros para que la energía absorbida sólo pueda disiparse como fotones. Tan pronto como nos alejamos de gases monoatómicos a baja presión, y consideramos las moléculas poliatómicas en líquidos y átomos en sólidos, nos enfrentamos con procesos competitivos en los cuales puede utilizarse la energía absorbida. Uno de tales procesos es, por ejemplo, el aumento de la frecuencia y amplitud de las vibraciones atómicas. El aumento de la energía vibratoria del sistema eleva la temperatura y disminuye la cantidad de energía disponible para emisión de luz. Por esta razón el mercurio es eficiente para producir luminiscencia en el estado gaseoso, pero no la origina en el estado líquido.

La luminiscencia solo puede ocurrir eficientemente en materiales donde hay átomos o moléculas especiales, en los que la energía absorbida puede emitirse mediante transiciones electrónicas ópticas, antes que disiparse como un aumento de energía vibratoria de los átomos.

En los sólidos, estos así llamados "centros de luminiscencia", pueden ser impurezas tales como los iones de cobre que reemplazan una fracción porcentual de los iones de zinc en el sulfuro de zinc y que otorgan a este último su familiar luminiscencia verde, o pueden ser defectos en las redes cristalinas, como la ocasional falta de iones de cloro que dan al cloruro de potasio su color rojo violáceo cuando se lo irradia con rayos X.

Desafortunadamente, estos centros, en la mayoría de los materiales luminiscentes, no están bien definidos y su comportamiento físico no es susceptible de un estudio teórico. En los materiales comercialmente importantes, como el sulfuro de zinc, los centros están formados por electrones unidos a través de complejas interacciones, tanto con los iones de una impureza (tal como cobre o plata), como con los iones de la red cristalina que los rodea. El acoplamiento resultante entre las diversas formas vibracionales de los átomos vecinos y la transición electrónica responsable de la luminiscencia, produce un amplio espectro, desprovisto de estructura definida, aún a bajas temperaturas.

Esta marcada dependencia con la red cristalina también causa problemas con las impurezas agregadas en forma no intencional, ya que unas pocas partes por millón de estas últimas, pueden bastar para inhibir totalmente la luminiscencia.

El conocimiento detallado de la estructura de los centros sería útil para dotar a los materiales luminiscentes de propiedades específicas. Por ejemplo sería deseable dar a los estados electrónicos la protección apropiada contra interferencias térmicas, para asegurar una transición de un color y duración especificados.

2.1.1 Fluorescencia y fosforescencia

La duración de la emisión, depende fuertemente de los procesos por los cuales la energía puede ser almacenada durante largos períodos de tiempo.

Este fenómeno de almacenamiento, es responsable de la persistencia de emisión

en ciertos materiales, mucho después que se ha retirado la fuente de excitación.

A este efecto, - que puede durar desde minutos a años -, se lo denomina fosforescencia para diferenciarlo de la fluorescencia, la cual se aplica a la emisión de luz sólo mientras se halla presente la fuente de excitación.

Hay una variedad de procesos por los cuales aparece la fosforescencia en sólidos. Por ejemplo un electrón que ha sido impulsado a un estado excitado, puede luego caer a un estado intermedio metaestable, desde el cual están prohibidas otras caídas posteriores por las leyes de selección de la mecánica cuántica que rigen estas transiciones.

El único medio por el que un electrón en esas condiciones puede regresar al primer nivel energético emitiendo luz, es que, previamente, vuelva al estado excitado.

Esto se logra ya sea con un tiempo relativamente largo (varios minutos) para que el electrón absorba la energía termal necesaria de la red cristalina, o bien llevándolo al estado excitado por acción de energía radiante. La cantidad de energía requerida es generalmente del orden de medio electrón-voltio, lo cual significa que el electrón podría ser excitado con rayos infrarrojos. De hecho con esta técnica se construyeron los visores a infrarrojos utilizados en la última guerra.

Normalmente la energía debe ser transportada del lugar de absorción al centro de emisión. La transferencia puede implicar el movimiento de electrones a través de la red cristalina, o puede ocurrir por resonancia. En este caso un átomo o molécula pasa la energía absorbida a un átomo vecino de igual estructura de niveles de energía, no excitado. Como este último átomo emitirá entonces luz, la transferencia de energía es irreversible.

Un ejemplo de transferencia por resonancia es el mecanismo de los tubos fluorescentes. La radiación excitante ultravioleta de 2.537 \AA proveniente de la descarga en el vapor de mercurio, es absorbida por un tipo de impureza (generalmente antimonio) en el recubrimiento del tubo. La energía puede ser emitida como luz azul o transferida en parte, por resonancia, a otra clase de impureza (generalmente manganeso) que emite luz amarillo-anaranjada (Fig. 3.)

Ajustando las concentraciones relativas de ambas impurezas, se obtiene por combinación la luminiscencia blanca.

La transferencia de energía por movimiento de electrones ocurre en muchos óxidos, sulfuros, selenuros y telurios. De éstos, los sulfuros de zinc y cadmio (que forman los tubos de rayos catódicos) han sido los más estudiados.

Para comprender este mecanismo, recordemos que en los sólidos los átomos están relativamente cerca unos de otros (aprox. 10^{22} átomos/cm³) e interaccionan entre sí tan fuertemente, que los niveles discretos de energía que los caracterizan cuando están aislados, se transforman en bandas amplias de estados de energía permitidos,

separadas por bandas de estados prohibidos. Estas bandas se extienden a través de la red cristalina. Fig. 4.

La banda permitida superior (zona de conducción) está normalmente vacía, mientras que la banda permitida inferior está completamente llena con los electrones de valencia (capa exterior) del átomo del cristal.

Ocurre que solamente en los modelos idealizados la banda prohibida está completamente vacía. Generalmente su potencial eléctrico está perturbado por defectos en la red cristalina, trazas de impurezas o átomos en los intersticios de la red. Estos sistemas producen niveles adicionales de energía, generalmente discretos, localizados en la región prohibida.

Algunos niveles están cerca de la banda de valencia y otros yacen justo debajo de la banda de conducción.

Los primeros sirven como centros luminiscentes, mientras que los últimos pueden capturar electrones de la banda de conducción; de aquí que se los llame "trampas".

La estructura de niveles con la introducción de centros producidos por impurezas y trampas debidas a imperfecciones del cristal, se representan en la Fig. 5.

Veamos como trabaja el sistema modificado. Si la excitación es suficientemente energética para producir una transición electrónica permitida (como es usual en muchos casos), entonces uno de los electrones de valencia será elevado a la banda de conducción, dejando en su lugar un espacio (hueco) que tiene todas las propiedades del electrón pero carga de signo opuesto (positiva).

Así, mientras el electrón viaja en la banda de conducción, este hueco positivo es atraído por un electrón en el primer nivel energético del centro luminiscente. Fig. 6.

Dada la proximidad de los niveles de energía entre el hueco y el electrón del centro se producirá la mutua captura, con lo cual el primer estado energético del centro queda vacío, es decir, vacante para otro electrón que pueda ocuparlo.

El electrón errabundo en la banda de conducción puede caer en el estado excitado del centro o en una de las trampas. Fig. 7.

En el primer caso, el electrón, luego de ocupar el estado excitado, cae al primer nivel del centro con la emisión de luminiscencia. Fig. 8.

En este mecanismo, el centro ha cumplido dos funciones:

- 1) Aumenta grandemente la probabilidad de una transición luminiscente. Podríamos tener luminiscencia si el electrón cayera directamente de la banda de conducción a la de valencia, lo cual efectivamente pasa en algunos casos. Pero esto solamente ocurre si el electrón puede hallar el hueco que, como hemos

visto, también se mueve. Tratándose de dos partículas en movimiento al azar, la interacción es muy improbable. Fijando uno de los componentes móviles del sistema, aumenta la probabilidad de que el otro lo encuentre.

- 2) Proveé los medios para obtener una radiación de mayor longitud de onda que la absorbida en la excitación.

Introduciendo por ejemplo átomos de cobre en el sulfuro de zinc, acortamos los saltos cuánticos de tal forma que la excitación con electrones de alta energía (como partículas beta), produce luz verde de menor frecuencia (o blanca como ocurre en la pantalla del televisor).

En cuanto a las trampas, ellas son responsables de la fosforescencia. Al igual que en los estados intermedios metaestables estos electrones deben saltar de nuevo a los niveles superiores, - en este caso la banda de conducción -, antes que puedan concluir su camino a los centros.

El tiempo en que la emisión se demora de esta forma, determina el período de la fosforescencia que a veces es necesario controlar por varias razones (tubos de TV, radar, etc.).

Cuando las transiciones electrónicas, - y de aquí la luminiscencia -, es inducida por radiación nuclear sin intervención de las "trampas", se está frente a materiales para contadores rápidos de centelleo.

Los procesos por los cuales tanto los rayos gamma como partículas cargadas excitan estas transiciones es complejo, especialmente en sólidos, donde ocurre dispersión y ionización múltiple durante la penetración.

El estudio anterior ya da idea de los mecanismos que intervienen en estos procesos. Como es fácil imaginar hay muchos otros procesos de absorción de energía sin emisión de luz, que compiten con la luminiscencia.

A pesar de todo, la eficiencia puede variar del 5% en materiales orgánicos, a más del 20% en fósforos luminiscentes inorgánicos como el sulfuro de zinc.

2.2.0 COMPUESTOS AUTOLUMINISCENTES

La combinación de un radioisótopo y un material luminiscente o fósforo, ambos de características apropiadas, dará un compuesto autoluminiscente capaz de emitir luz sin excitación externa.

Como es obvio, la energía consumida en el proceso es suministrada por las radiaciones nucleares, y la calidad y duración de la emisión de luz, dependerá tanto del fósforo como del radioisótopo elegido.

Se pueden seleccionar fósforos con emisión infrarroja, visible o ultravioleta. Los colores verdes y amarillos, sin embargo, son los más eficientes para convertir radiaciones ionizantes en luz visible. Menos eficientes son los azules y considerablemente más bajos los rojos.

La selección de fósforo para la fabricación de un determinado compuesto autoluminiscente implica la cuidadosa evaluación de los siguientes parámetros:

- a) eficiencia de conversión de radiación atómica a luz visible;
- b) determinación del espectro de emisión;
- c) resistencia al daño por radiaciones;
- d) resistencia al envejecimiento;
- e) compatibilidad con los componentes agregados (activador y aglomerante).

La Tabla 1 da la respuesta de cuatro fósforos seleccionados conforme a la evaluación antedicha, frente a la radiación beta de un activador típico.

La selección del radioisótopo se hace teniendo en cuenta:

- a) eficiencia para excitar luz;
- b) durabilidad del compuesto;
- c) seguridad radiológica;
- d) costo.

Estas especificaciones establecen condiciones muchas veces antagónicas, que obligan a soluciones de compromiso.

TABLA 1. FOSFOROS: COLOR Y EFICIENCIA

Tipo de fósforo (color)	Pico de emisión (Å)	Eficiencia relativa (brillo relativo)
Verde	5.200	10.0
Amarillo	5.700	7.5
Azul	4.500	3.0
Rojo-anaranjado	6.000	0.5

La capacidad de un dado radioisótopo para activar un material fosforescente, depende del tipo y energía de la radiación emitida.

Los rayos alfa, beta y gamma tienen eficiencias variables dentro de un amplio margen para ionizar o excitar el medio que atraviesan. Las relaciones son aproximadamente 10.000 : 100 : 1 para alfa, beta y gamma. Así las partículas alfa parecerían ser las más convenientes para producir excitación en fósforos. De hecho, se pueden fabricar fuentes luminosas de brillo extraordinario con emisores alfa.

Sin embargo, la intensa ionización destruye pronto las propiedades luminiscentes de los fósforos actualmente disponibles.

Por esta razón no se puede esperar que los materiales activados con radio mantengan durante largo tiempo el brillo inicial.

Los rayos gamma tienen muy poca eficiencia para estimular fósforos, debido a su gran penetración en los materiales. Sólo una pequeña fracción de su energía es absorbida por el fósforo, y el resto escapa al medio circundante.

Los emisores beta tienen buena eficiencia para excitar luz en fósforos, lo cual, sumado a las consideraciones anteriores, hace que sean los únicos utilizados actualmente para la fabricación de compuestos autoluminiscentes.

Razones de vida media y costo, generalmente limitan la elección a los cuatro emisores beta indicados en la Tabla 2.

TABLA 2. PROPIEDADES DE ACTIVADORES RADIOISOTOPICOS

Propiedad	^3H	^{147}Pm	^{85}Kr	$^{90}\text{Sr/Y}$
Período (años)	12.5	2.6	10.3	28
Costo (aprox.) del isótopo m\$/n/Curie	700	114	3.500	700
Energía max. MeV	0.018	0.22	0.67	0.61 2.18
Forma física	gas o combinado	sólido inerte	gas	sólido inerte

El brillo de un determinado fósforo dependerá tanto de la cantidad como de la energía de las partículas que interaccionan.

En la Tabla 3 se comparan los brillos obtenidos con emisores beta de diferentes energías, pero de igual actividad.

TABLA 3 EFECTO DEL INCREMENTO DE LA ENERGIA BETA EN EL RENDIMIENTO DE LUMINISCENCIA

Isótopo	Forma	Eficiencia relativa
^3H	Combinado	1
^{147}Pm	Sólido inerte	50
^{85}Kr	Gas	100
^{90}Sr	Sólido inerte	250

El máximo brillo obtenible con un dado fósforo depende de los siguientes factores

- a) energía del emisor beta;
- b) relación geométrica o espacial entre fósforo y activador;
- c) dosis máxima permisible en la superficie del dispositivo autoluminiscente.

El factor b) es tan o más importante que la energía del emisor. Esto es especialmente cierto en el caso del ^3H , el cual se puede usar en la forma de gas o combinado con moléculas de sólidos orgánicos (plásticos tritiados).

En este último caso el compuesto tritiado está en íntimo contacto con los cristales del fósforo. En la forma gaseosa el ^3H está contenido en una ampolla cuya superficie interna está recubierta por el fósforo, y su rendimiento luminescente es varias veces superior al de las fuentes de compuestos tritiados. Las fuentes autoluminiscentes de ^{85}Kr son esencialmente similares a las de ^3H en la forma de gas.

Los brillos máximos obtenibles atendiendo solamente a la energía del emisor, y considerando los tipos convencionales de fuentes autoluminiscentes, se indican en la Tabla 4.

TABLA 4 MAXIMO BRILLO PRACTICABLE

Isótopo	Forma	Máximo brillo microlambert (*)
^3H	Combinado	50
^{147}Pm	Sólido inerte	1000
^{85}Kr	Gas	3000
$^{90}\text{Sr}/\text{Y}$	Sólido inerte	3000

(*) Un lambert es el brillo de una superficie que refleja o emite un lúmen por centímetro cuadrado.

A continuación se dan algunos niveles de brillo familiares, que permiten una apreciación de la Tabla anterior.

Luz solar sobre nieve	10^4 mililambert
Lámpara fluorescente	10^3 mililambert
Pantalla TV	30 mililambert
Dial de reloj luminoso	5 microlambert
Bandas fluorescentes	0,1 microlambert

Un factor que a menudo limita el brillo de una fuente autoluminiscente, es la cantidad de radiación superficial que se puede tolerar en una dada aplicación.

Los emisores beta débiles, tales como el ^3H , producen muy pequeña radiación externa aun con actividades relativamente grandes, mientras que el ^{90}Sr , como es sabido, da dosis elevadas.

La Tabla 5 muestra los niveles de exposición externa para distintos emisores beta, comparados para un mismo brillo del compuesto luminiscente.

TABLA 5 EXPOSICION EXTERNA EN FUNCION DE LA ENERGIA BETA
(Radiación medida a través de 1/4" de lucite)

Isótopo	Brillo (μl)	Actividad mc	Exposición en (mr/h)		
			en superficie	a 3"	a 6"
^3H	50	500	0	0	0
^{147}Pm	50	10	1	0.2	0
$^{90}\text{Sr}/\text{Y}$	50	2	7	1	0.2

La radiación externa que atraviesa el lucite de 1/4", proviene de la radiación de frenado (Bremsstrahlung) originada en la interacción de la radiación beta con la materia. A mayor energía beta mayor intensidad de radiación de frenado y mayor poder penetrante.

Por lo tanto, el mejor criterio es usar emisores beta de energía suficiente para lograr el brillo previsto, pero no demasiado elevada como para generar excesiva radiación de frenado.

Los cuatro emisores beta indicados en la Tabla 2, son los mejores isótopos para activar materiales luminiscentes. Cada uno tiene sus propias características que lo hacen apto para una determinada aplicación.

2.2.1 Inactivación biológica de radioisótopos

Como ocurre con todas las aplicaciones donde se utiliza material radiactivo, la construcción y uso de compuestos autoluminiscentes están sujetos a normas de seguridad radiológica, tanto para limitar la exposición externa como prevenir riesgos de contaminación.

La exposición externa depende, como hemos visto, de la energía y actividad del radioisótopo y de las características constructivas del dispositivo autoluminiscente. El nivel máximo permisible dependerá del tipo de aplicación y es relativamente fácil de controlar a través de los parámetros mencionados precedentemente.

Bajo este aspecto muchas construcciones autoluminosas se pueden usar con seguridad en condiciones ambientales normales.

Sin embargo, un incendio, una explosión, otras fuerzas destructivas accidentales, pueden liberar el radioisótopo al ambiente. Si el material radiactivo está en forma soluble, - como el Pm_{203} y todos los materiales del Ra -, al ser eventualmente ingerido o inhalado será incorporado a los procesos metabólicos del cuerpo.

La técnica para evitar este definitivo riesgo, consiste en incorporar el radioisótopo a materiales cerámicos inertes, (microesferas, por ejemplo), capaces de resistir la acción de altas temperaturas, ácidos y abrasión, sin liberar la sustancia radiactiva.

Estos compuestos radiactivos inertes se consiguen comercialmente.

2.2.2 Tipo de fuentes autoluminiscentes

Prácticamente existen dos tipos:

- 1) El activador y fósforo se mezclan íntimamente con un aglomerante y el compuesto se aplica como pintura. Ejemplos: cuadrantes de instrumentos, avisos de emergencia, y todo tipo de señales que deben ser visibles en la oscuridad. El radioisótopo debe ser sólido o si es gas, como en el caso del tritio, debe estar previamente incorporado a un sólido.
- 2) El fósforo se mezcla con un aglomerante y se aplica en la pared interna de una cápsula sellada, generalmente de vidrio, en cuyo interior está el material radiactivo, generalmente en la forma de gas (Tritio o Kriptón 85).

Las cápsulas pueden adoptar cualquier forma imaginable para adaptarlas a fines específicos. Externamente se usan pinturas blancas, reflectores y cristales, para aumentar el brillo.

Las especificaciones técnicas de una amplia variedad de fuentes pueden consultarse en los catálogos de las firmas proveedoras (9) (10).

2.2.3 Aplicación de autoluminiscentes

Un resumen no exhaustivo de la aplicación de compuestos luminiscentes es:

- cuadrantes de teléfonos;
- cuadrantes de aparatos de medida;
- compases de navegación, brújulas;
- niveles a burbuja;
- instrumentos de óptica, micrómetros;
- fuentes luminosas para fotometría;
- señalización, balizamiento;
- acoplamiento con células fotoeléctricas.

3.0.0 BATERIAS NUCLEARES

Bajo esta denominación agrupamos los dispositivos con radioisótopos que producen potencia eléctrica por:

- 1) transferencia directa de carga;
- 2) ionización y excitación;

y reservamos el nombre de generadores isotópicos, para los que transforman el calor generado por las radiaciones en electricidad.

3.1.0 TRANSFERENCIA DIRECTA DE CARGAS

Se utilizan en general emisores beta tales como $^{90}\text{Sr}/\text{Y}$, ^{85}Kr , ^{147}Pm , ^{144}Ce .

El emisor está rodeado por el colector de cargas y aislado de él por medio de un buen dieléctrico (vacío, teflón o polietileno), como se indica en la Fig. 9, a, b.

El colector debe tener un espesor suficiente como para frenar todas las partículas beta incidentes en la cara interna.

En el caso b) la energía beta y el espesor del dieléctrico deben estar relacionados de tal forma que una buena proporción de partículas puedan atravesar el dieléctrico y

llegar al colector .

El principio de funcionamiento es el siguiente:

El colector acumula las cargas (electrones, como hemos dicho) radiadas con alta energía cinética (del orden del MeV) por el emisor . Durante este proceso el potencial del colector se hace negativo respecto al emisor , en forma continua y creciente, hasta que se alcanza una situación de equilibrio . El régimen o velocidad de transferencia de cargas, la energía de las partículas, y la capacidad eléctrica del sistema, determinan las características de estas pilas, tanto en funcionamiento con carga, como en circuito abierto .

En circuito abierto, el equilibrio se alcanza cuando la velocidad de pérdidas por aislación debidas a la alta diferencia de tensión entre electrodos, iguala la velocidad con que se acumulan las cargas . En ese punto la tensión de la batería puede llegar a de cenas de miles de voltios, si la energía de las partículas es grande como ocurre con el ^{85}Kr y el ^{90}Sr .

Analizaremos las características y aplicaciones de una batería comercial de este tipo, representada en la Fig. 10 .

Como se observa el funcionamiento es esencialmente similar al del tipo b), con la diferencia que la fuente es gaseosa .

El valor teórico de la corriente para un curie de material radiactivo, en el supuesto de que se colectan todas las cargas, será:

$$I = \frac{\text{No. de cargas}}{\text{segundo x curie}} \times \frac{\text{coulomb}}{\text{carga}} \quad (\text{ampere/curie}) \quad (3.1)$$

$$I = 3,7 \times 10^{10} \times 1,6 \times 10^{-19} \quad \text{A/c}$$

$$I = 6 \times 10^{-9} \quad \text{A/c}$$

Este es el valor máximo de la corriente de carga .

Cuando se extrae potencia de la batería, la curva característica de la corriente en función del potencial, adopta la forma representada en la Fig. 11 .

Un prototipo comercial de una batería similar a la de la Fig. 10, entrega una corriente de 10^{-9} A a 100 V . El peso de la batería es de 3 gramos, y su tamaño el de un cilindro de 14 mm de diámetro por 25 mm de longitud (sin blindaje) .

Como la corriente entregada es sumamente pequeña, para las aplicaciones prácticas se recurre a los condensadores (de muy buena aislación) a fin de acumular una cantidad suficiente de energía, y utilizarla luego como un pulso de corriente, durante la des carga del condensador .

La relación entre voltaje, corriente, tiempo y capacidad se expresa por la ecuación

$$V = \frac{i t}{C} \quad (3.2)$$

V, voltaje a través del capacitor (típicamente 1.000 V).

i, corriente entregada por la batería (A).

t, tiempo durante el cual la corriente es entregada (s).

C, capacidad externa (F).

Para mantener el voltaje de la fuente en un valor constante, se puede conectar en paralelo con el condensador, un diodo de cátodo frío y alta aislación (Fig. 12).

Cuando se cierra la llave (vibración, aceleración, o cualquier otro efecto mecánico), el condensador C descarga a través del circuito externo de carga.

Tal dispositivo es una fuente pulsante de energía eléctrica, utilizada para disparar detonadores, actuar contadores de impulsos, o para la operación pulsante de relays.

Cabe mencionar que en las aplicaciones prácticas todo el circuito de poder integrado por la batería, condensador y diodo (con su resistencia), está encapsulado en una unidad sellada capaz de soportar severas especificaciones como las que rigen en los usos militares, de cohetaría, etc.

Estas baterías se aplican también en dispositivos de retardo.

La Fig. 13 ilustra uno de estos dispositivos, basados en un circuito de corriente constante.

La llave está normalmente cerrada; cuando la acción que determina la operación de este circuito abre la llave, la batería comienza a cargar el condensador C hasta alcanzar la tensión de disparo del diodo gaseoso. La energía hasta ese momento acumulada en el condensador, es entregada en forma de pulso a la carga.

El tiempo de retardo se puede calcular también de la ec. (3.2) donde V es la tensión de disparo del diodo. Como ejemplo, el menor tiempo de retardo actualmente posible con este circuito, está limitado por la mínima capacidad práctica (300 pF), máxima corriente entregada por la batería (10^{-9} A) y el mínimo voltaje de disparo de los diodos (100 V).

$$t = \frac{(300 \times 10^{-12} \text{ F.}) (100 \text{ V})}{10^{-9} \text{ A}} = 30 \text{ segundos.}$$

Con el uso de capacitores de teflón o vidrio y con diodos elegidos de mínima corriente de fuga justo por debajo del voltaje de ruptura, se han logrado retardos máximos hasta de 100 horas.

3.2.0 IONIZACION Y EXCITACION

La energía cinética de las partículas se transfiere por ionización y/o excitación a un gas, un semiconductor, o un compuesto luminiscente.

Los iones producidos en un caso, y los fotones de luz en el otro, son colectados y transformados en corriente eléctrica.

En la Fig. 14 a, b, se ilustran los dos tipos comunmente utilizados:

En el caso a) dos electrodos de metales electroquímicamente distintos, se sumergen en un volumen de gas radiactivo o ionizado por radiación. Los iones son colectados por los respectivos electrodos, estableciéndose así una corriente eléctrica a través de la carga. La diferencia de potencial es del orden de 1 á 2 V. Con 50 mc de ^3H la corriente es de unos 10^{-8} A.

En el caso b) la luz excitada por las radiaciones en el fósforo, genera una pequeña diferencia de potencial (menos de 1 V) en la célula foltovoltaica. El proceso es el siguiente: los fotones de luz crean electrones libres y huecos en el semiconductor. Los electrones tienen suficiente energía como para atravesar la capa límite y acumularse en el colector de metal. En cambio los huecos quedan retenidos por trampas (impurezas) en el semiconductor.

Se establece así una diferencia de potencial que equilibra el proceso para un flujo de luz constante.

Con 5 c de ^{147}Pm mezclados con S Cd se obtienen unos 20 μ A a un potencial de 1 V. El conjunto de la batería tiene el tamaño de un botón pequeño.

4.0.0 GENERADORES ISOTOPICOS

En estos dispositivos parte del calor generado por las radiaciones nucleares al ser absorbidas por el medio circundante, es convertido en electricidad mediante un sistema adecuado. El resto del calor se disipa al ambiente.

4.1.0 FUENTES DE CALOR

Hay dos tipos:

a) Productos de fisión: La evacuación de estos desechos de la industria nuclear constituye un problema de importancia. Para 1975 se prevé una acumulación de 12.000 millones de curie de productos de fisión que equivalen a cerca de 50 MW de potencia. Su utilización satisfaría dos necesidades: destino de los desechos y producción de potencia útil.

b) Radioisótopos artificiales: que se obtienen por irradiación de elementos en los reactores.

La selección del combustible para el generador, depende de las siguientes variables:

- 1) densidad de potencia en W/g;
- 2) vida media;
- 3) costo;
- 4) disponibilidad;
- 5) blindaje;
- 6) seguridad en el uso.

En la Tabla 6 se indican algunos radioisótopos adecuados, con sus características más importantes.

TABLA 6 ISOTOPOS USADOS EN GENERADORES

Isótopo	Período	Compuesto	Densidad del compuesto g/cm ³	Potencia específica W/cm ³	Costo futuro estimado (US\$/W)
¹⁴⁴ Ce	285 días	Ce O ₂	6,4	12.5	14
¹⁴⁷ Pm	2,6 años	Pm ₂ O ₃	6,6	1.1	1630
⁹⁰ Sr	27,7 años	Sr Ti O ₃	4,85	0,54	23
²⁴² Cm	162 días	Cm 30Ni	8,7	128.5	45
²³⁸ Pu	86,4 años	Pu	16	9,3	1600

Los 3 primeros son productos de fisión emisores beta.

Los 2 restantes radioisótopos artificiales emisores α . Para aplicaciones terrestres en la escala de 0,1 a 100 W eléctricos el ⁹⁰Sr es superior al resto. Para fuentes muy intensas > 500 W son posibles el ⁹⁰Sr, ⁶⁰Co y mezclas de productos de fisión. Para aplicaciones espaciales los emisores α (alta potencia específica y blindaje liviano). Para aplicaciones médicas de baja potencia se prefiere el ²³⁸Pu.

4.2.0 CONVERSION DE ENERGIA

Existen tres sistemas básicos

- a) termoeléctrico;
- b) termoiónico;
- c) dinámico o turboeléctrico.

4.2.1 Sistema termoeléctrico

Este es el sistema más generalizado actualmente en uso, para potencias eléctricas que van desde menos de 1 miliwatt (aplicaciones médicas) hasta 100 W.

El principio físico de conversión termoeléctrica es el efecto Seebeck, conocido desde 1821, y cuya aplicación más difundida es la termocupla. Cuando dos metales diferentes se conectan formando una espira cerrada, y los extremos están a distinta temperatura, circula una corriente eléctrica. Uno de los elementos, del tipo N tiene exceso de electrones; el otro del tipo P es electropositivo, con exceso de "huecos". Los electrones circularán en la dirección de la temperatura decreciente, y los huecos en sentido opuesto, Fig. 15.

La potencia y voltaje de una termocupla (o de varias conectadas en serie), dependen de las propiedades termoeléctricas del material usado, de la diferencia de temperaturas entre las uniones fría y caliente (T_F y T_C), y de la cantidad y dimensiones de las termocuplas.

La eficiencia de conversión de los generadores termoeléctricos es:

$$\eta = \left(\frac{T_C - T_f}{T_C} \right) \cdot \left(\frac{\sqrt{1 - Z \cdot T} - 1}{\sqrt{1 - Z \cdot T} - T_f/T_C} \right) \quad (4.1)$$

El primer paréntesis representa la eficiencia del ciclo térmico de Carnot y el segundo la eficiencia de conversión del material termoeléctrico usado. El término:

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{K}$$

se denomina índice termoeléctrico de mérito siendo:

- α , coeficiente de Seebeck. (V/C)
- σ , conductividad eléctrica (ohm.cm)
- K , conductividad térmica (W/cm C)

$$T = \frac{T_C + T_f}{2}$$

Para valores grandes de $Z.T$, n se aproxima a la eficiencia del ciclo de Carnot.

Para alto Z se requieren materiales con elevado coeficiente Seebeck, buena conductividad eléctrica y baja conductividad térmica. Estos parámetros generalmente dependen de la temperatura, de modo que el índice de mérito Z también depende de la temperatura.

Por esta razón, ningún material es por sí sólo igualmente apto para la eficiente conversión de potencia, en una amplia escala de temperaturas.

Hasta ahora los materiales con mejores eficiencias son semiconductores, habiéndose logrado compuestos con altos valores de ZT a temperaturas hasta 1000 C.

En la Tabla 7 se han clasificado los materiales termoeléctricos, en función de la escala de temperatura a la que pueden operar satisfactoriamente.

TABLA 7 MATERIALES TERMOELECTRICOS PARA DISTINTAS ESCALAS DE TEMPERATURA DE TRABAJO

Temp. C	Denominación del material base	Fórmula
0-200	Teluro de bismuto	$Bi_2 Te_3$
0-500	Teluro de Plomo	$Pb. Te$
	Teluro de Plata-Antimonio	$Ag SbTe_2$
	Teluro de Germanio	$Ge Te$
	Teluro de Estaño	$Sn Te$
500-1000	Hierro-Silicio	$Fe Si_2$
	Aleaciones Germanio-Silicio	$Ge Si$

El diseño y montaje de las termocuplas en los generadores isotópicos está influenciada por una cantidad de factores, entre ellos, el voltaje requerido para una dada aplicación.

Los materiales termoeléctricos son, por naturaleza, de bajo voltaje y alta corriente continua y es usual alimentar con ellos inversores/convertidores que suministran la corriente continua o alterna, al voltaje correcto para una determinada aplicación.

La eficiencia de los sistemas inversores/convertidores depende en alto grado, del voltaje al cual se suministra la potencia. En los mejores sistemas se requieren, por lo menos, de 4,5 a 6 V para una eficiencia mayor del 90%.

Para muchas aplicaciones se necesita una salida de 10 W eléctricos, lo cual significa que el generador debe producir por lo menos 0,5 V por W eléctrico y, en algunos casos, de 1 a 2 V.

Para conseguir 1 V/W, es necesario usar elementos termoelectricos de unos 0,3 cm de diámetro por 2,5 cm de longitud. Cuando los materiales termoelectricos tienen propiedades mecánicas pobres, como ocurre con los telurios, se adopta una construcción modular en la cual las cuplas y sus conexiones, están cementadas en conjunto.

Es probable que la mayoría de los generadores isotópicos termoelectricos de baja potencia utilicen ese tipo de módulos. Actualmente se pueden obtener eficiencias totales del 4% en generadores con salida de 10 W eléctricos y más. El límite de eficiencia teórica, con los materiales termoelectricos actuales, no supera el 10%.

Los principios básicos de diseño de un generador termoelectrico se ilustran en la Fig. 16.

La fuente de calor encapsulada es de forma cilíndrica y está rodeada por material aislante térmico en toda su superficie, excepto en las zonas de contacto con los módulos termoelectricos (pueden ser las bases del cilindro).

El conjunto está rodeado de un blindaje biológico que reduce la radiación externa a los niveles permisibles para el transporte. Una idea de la actividad usada la da el siguiente ejemplo: para producir 5 W de potencia eléctrica con ^{90}Sr como combustible, y suponiendo un rendimiento total del 5%, se requieren 100 W de potencia calorífica. La energía promedio de cada desintegración beta es el 44% de la energía máxima, es decir $0,44 (0,55 + 2,26) \text{ MeV} = 1,24 \text{ MeV}$. Como $1 \text{ MeV} = 1,6 \times 10^{-13} \text{ W.s}$ y $1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ d/s}$ la actividad de la fuente es:

$$A = \frac{100 \text{ W}}{(1,24 \text{ MeV/d}) (1,6 \times 10^{-13} \text{ W.s/MeV}) (3,7 \times 10^{10} \text{ d/s/c})} = 14.000 \text{ c}$$

La potencia decae en la misma proporción que la actividad.

En los EEUU el costo de un generador termoelectrico comercial de 25 W, con fuente de ^{90}Sr es del orden de U\$S 60.000. Las curvas de la Fig. 17 representan el costo estimado en libras esterlinas por wathora eléctrico, para generadores termoelectricos de ^{90}Sr con potencias menores que 100 W, partiendo de un precio de 0,125 libras esterlinas por curie de ^{90}Sr . En dichas curvas se establece una comparación para generadores con blindajes de plomo (o acero) y uranio respectivamente.

4.2.2 Conversión termoiónica

Este sistema, ilustrado en Fig. 18 (flujo de electrones en vacío), puede tener un gran futuro, pero al presente no está tan bien desarrollado como el sistema de conversión termoelectrica.

Datos típicos sobre este sistema de conversión son:

Temperatura del emisor 1.600 K

Temperatura del colector 800 K

Voltaje de salida, 0,5 V

Densidad de corriente 5 A/cm²

Densidad de potencia 2-5 W/cm²

Eficiencia 5-10%

4.2.3 Conversión dinámica o turboeléctrica

Arriba de 500 W eléctricos los sistemas dinámicos se tornan factibles, con la ventaja de una más alta eficiencia (típicamente 20-40%) respecto a los anteriores (5-10%). A medida que la potencia aumenta, la eficiencia de conversión se vuelve más importante para reducir la existencia de combustible en el generador.

Un ejemplo de las máquinas turboeléctricas que utilizan combustible isotópico, es una turbina (ciclo Rankine) desarrollada en la Rep. Fed. Alemana, que emplea mercurio como fluido de trabajo. La temperatura de la fuente y la presión del mercurio son 750 C y 8,5 Kg/cm² respectivamente. La eficiencia adiabática es del 56%. La velocidad de la turbina es de 50.000 rpm.

Los radioisótopos usados en estos sistemas son: ⁹⁰Sr, mezcla de productos de fisión (ambos en Europa) y ⁶⁰Co (en USA).

4.3.0 APLICACIONES DE LOS GENERADORES ISOTOPICOS

Las aplicaciones de los generadores isotópicos se pueden dividir en dos grandes grupos: espaciales y terrestres. Las primeras son las que en realidad dieron impulso al desarrollo y construcción de estos dispositivos. Actualmente hay varios satélites alimentados con generadores isotópicos.

Entre las aplicaciones terrestres mencionaremos.

- Navegación marina: existen varios programas en marcha en USA, UK y Europa para incorporar los generadores isotópicos a los sistemas de señalización en la navegación marina (boyas luminosas, sonar submarino, etc). Se han probado con éxito diversos prototipos en el rango de 1 a 60 W.

- Meteorología: puede preverse ésta aplicación en el futuro, cuando se instale una densa red mundial de estaciones que cubriría las zonas ártica y antártica y los océanos.

Hay unos 3 ó 4 generadores en uso para este propósito, en el rango de 5 a 60 W.

- Telecomunicaciones: los generadores son particularmente convenientes para los repetidores en cables submarinos.

- Navegación aérea: en este caso, el uso de generadores está limitado a estaciones de señalización en áreas remotas, donde la energía isotópica puede resultar más e conómica que las otras fuentes disponibles.

- Usos médicos: los marcapasos o "pacemakers" que se emplean para estimular y regular los latidos del corazón, utilizan normalmente baterías de mercurio de 2 á 3 años de vida.

Como estos marcapasos deben ser insertados en el organismo mediante peligrosas operaciones quirúrgicas, representaría una gran ventaja el poder disponer de baterías de más larga duración, para reducir la frecuencia de intervenciones. Por lo tan to los generadores isotópicos tienen en esta aplicación un futuro muy promisorio. En Europa se requieren 10.000 de estos dispositivos por año y en los EEUU una cantidad aproximadamente igual. La potencia es del orden de 90 a 400 μ W. Los generadores isotópicos de ^{238}Pu se usan ya experimentalmente para este objeto. El costo es menor que U\$S 1.000.-

Otras aplicaciones médicas previsibles son generadores para bombas cardíacas y aparatos ortopédicos.

- Otros usos: relojes, alarmas, protección catódica, etc.

BIBLIOGRAFIA

- (1) Applied Physics Group, Power from Radioisotopes (Serie de 7 informes, Harwell, Reino Unido).
- (2) Bowen, E.J., Garlick, G.F.J., International Science and Technology, No. 56 (1966).
- (3) CEA-ENEA Centre d'Information sur les generateurs isotopiques, Bulletins Nos. 1-2 (Sept.- Nov. 1966).
- (4) Holm, W.M., Radiation Luminiscence and its Applications to Highway Engineering, Oak Ridge Institute of Nuclear Studies, (Marzo 29, 1963).
- (5) Morse, J.G., (The Martin Company, Baltimore, Md., EE.UU) Isotopic Power, Nuclear Science and Engineering Conference, P.No. 50, New York, EE.UU. (abril 4-7, 1960).
- (6) OIEA, 66 - 5636.
- (7) Perdreaux, R., Electro Technology, (abril 1962).
- (8) Pollock, J.F., Economic Aspects of Isotopic Generators, UK AEA/ENEA, International Symposium on Industrial Applications for isotopic Power Generators, P. No. 44, Harwell, Reino Unido (1966).
- (9) 3 M Nuclear Products, 3 M Brand Self Luminous Materials , Minnessotta, EE.UU.
- (10) S.R.N.E., Standard Betalight Specifications, Hayes, Middlesex, Reino Unido.
- (11) Yeats, F.W., R.I.P.P.L.E. Programme, Harwell, Reino Unido (1966).

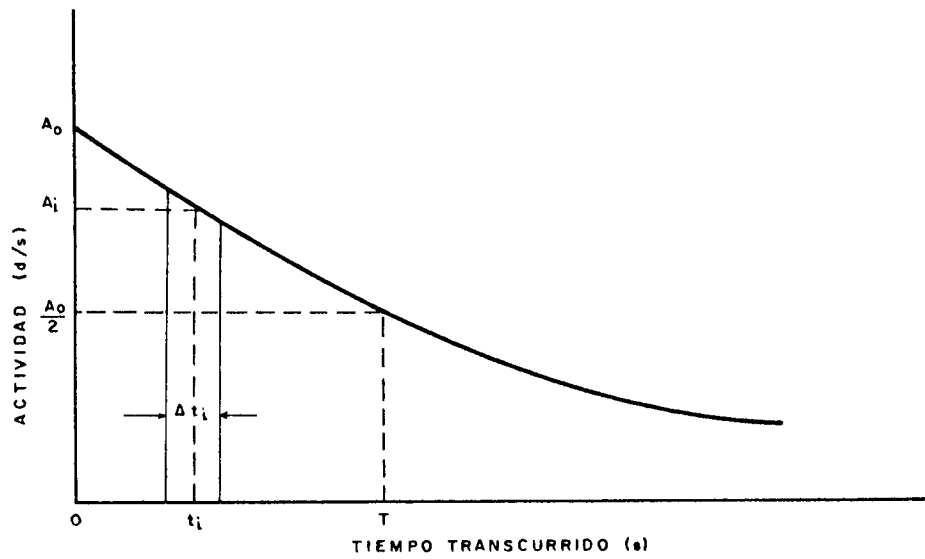


Fig. 1. Variación de la velocidad de desintegración (actividad), en función del tiempo. T es el período de semidesintegración.

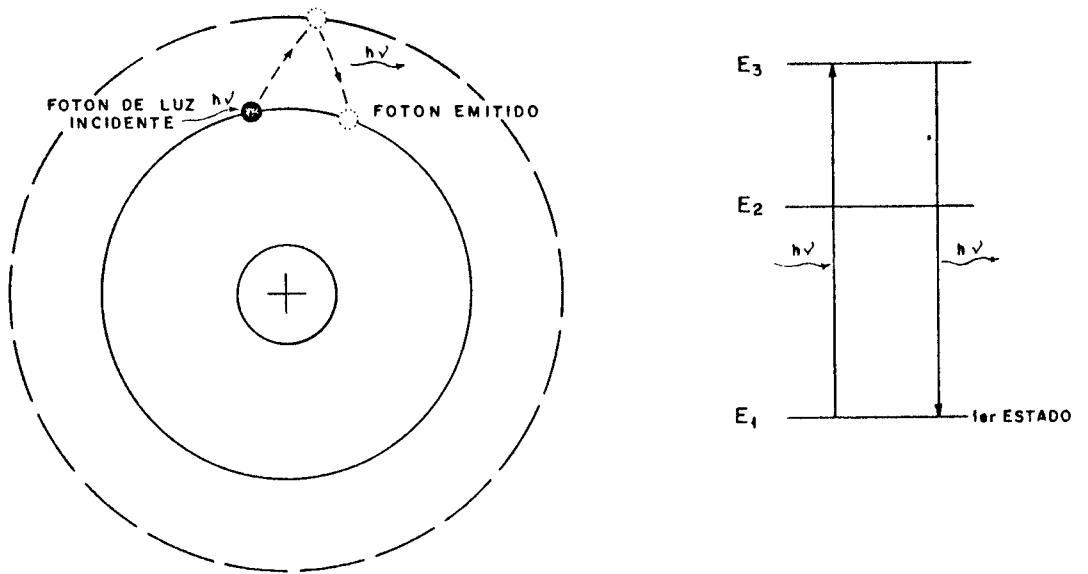


Fig. 2. Proceso de luminiscencia en un átomo de hidrógeno.

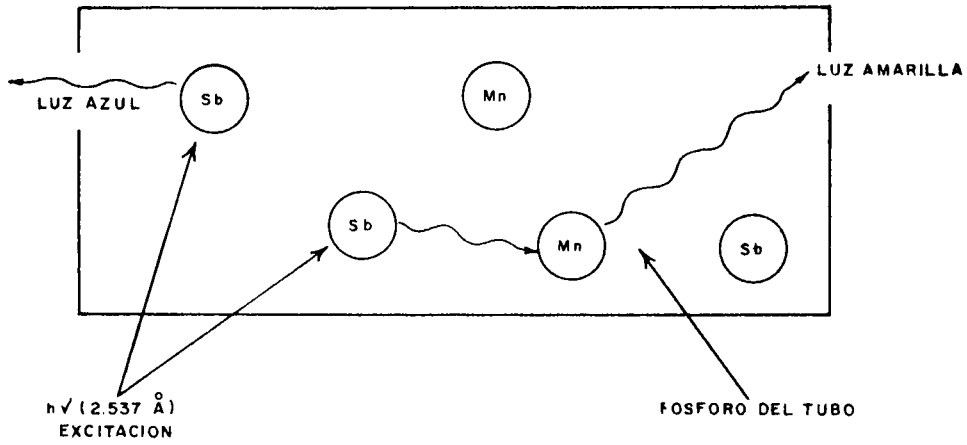


Fig. 3. Transferencia de energía por resonancia, en tubos fluorescentes.

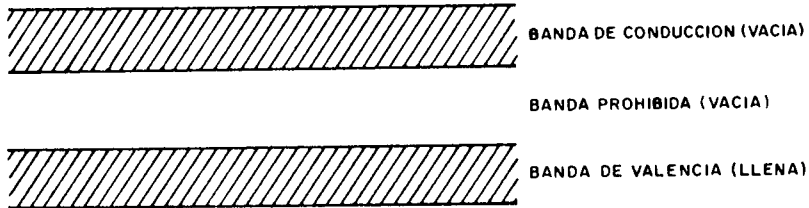


Fig. 4. Bandas de energía de los átomos no aislados

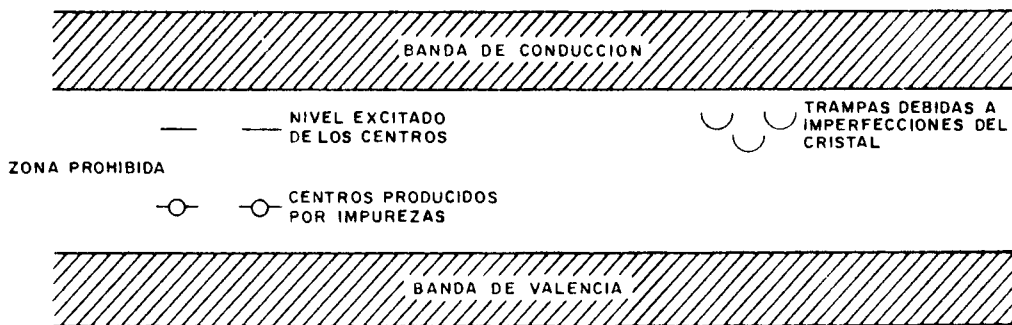


Fig. 5. Modificación de los niveles de energía, por la presencia de impurezas o imperfecciones en la red cristalina.

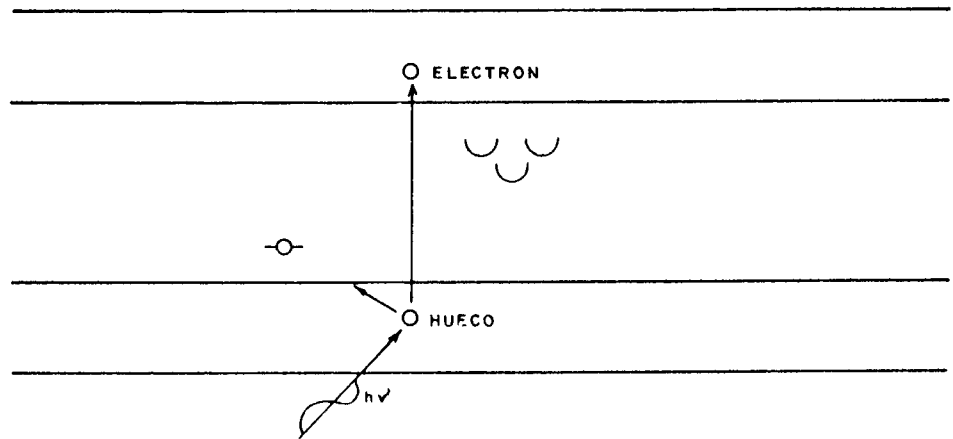


Fig. 6. El electr3n elevado a la banda de conducci3n deja un "hueco" positivo, el cual es luego atra3do por el electr3n del centro luminiscente no excitado.

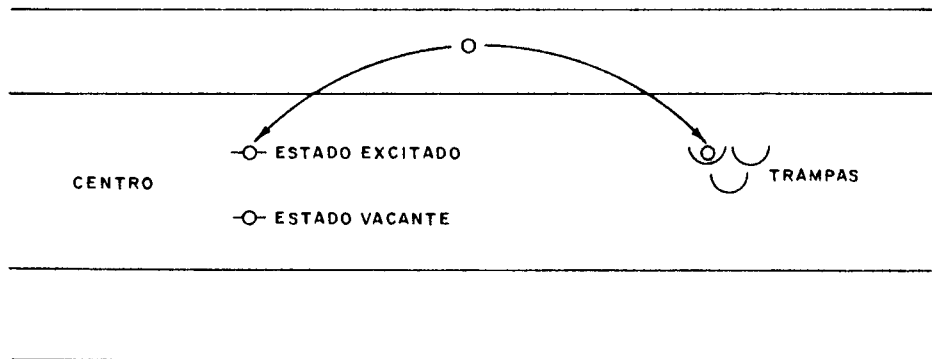


Fig. 7. Posibilidades de la transici3n electr3nica.

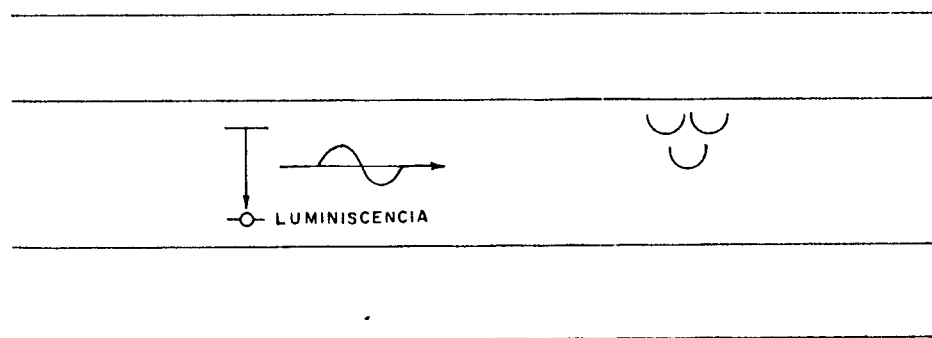


Fig. 8. Emisi3n de luz.

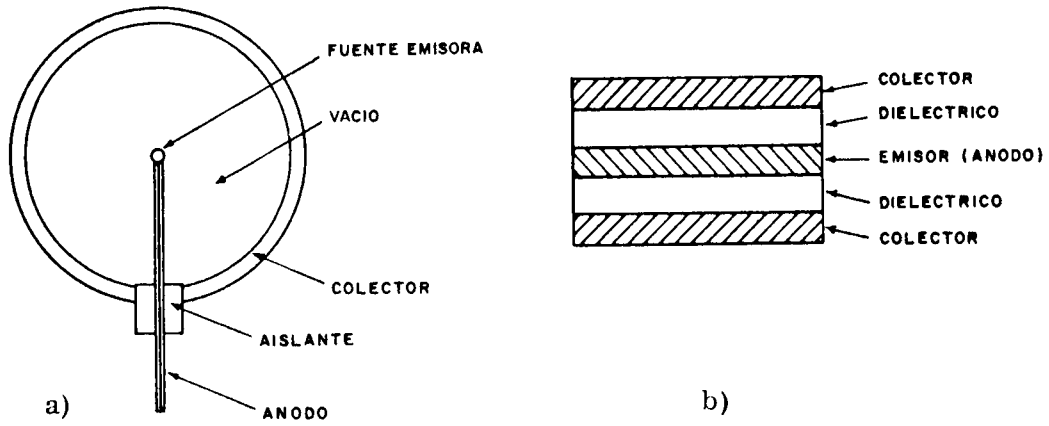


Fig. 9. Baterías nucleares basadas en la transferencia directa de cargas.

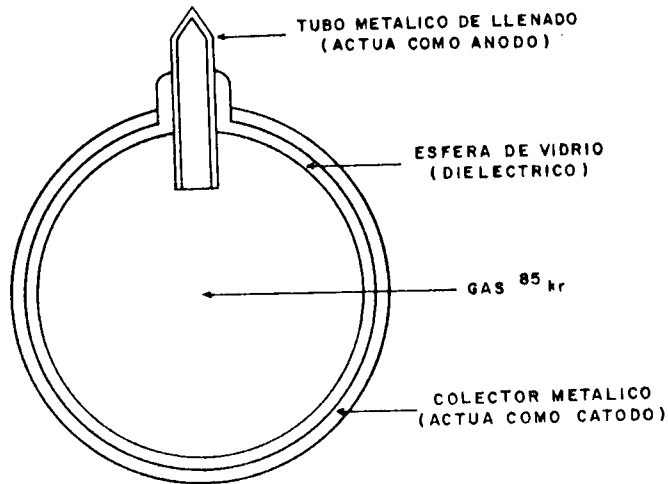


Fig. 10. Batería nuclear alimentada con ⁸⁵Kr (gas).

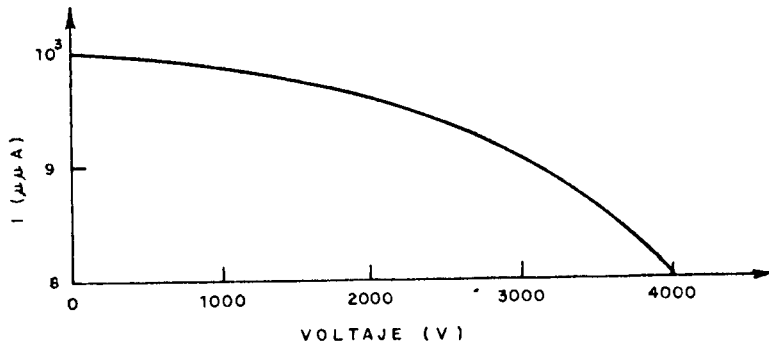


Fig. 11. Corriente en función del voltaje, para una batería nuclear de ⁸⁵Kr gaseoso.

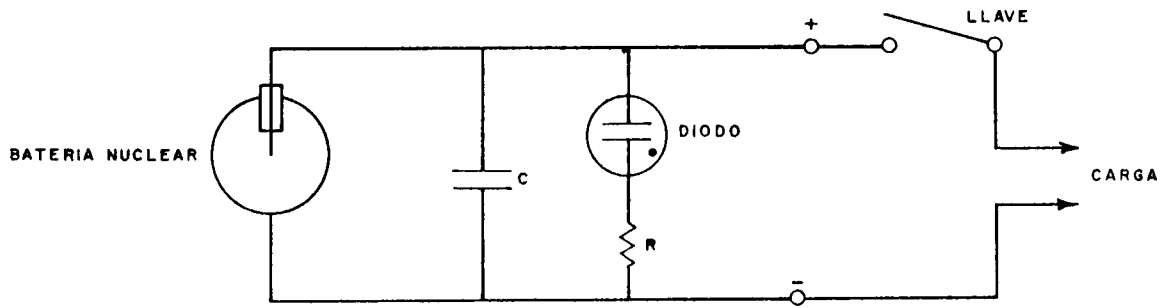


Fig. 12. Circuito típico de una batería nuclear.

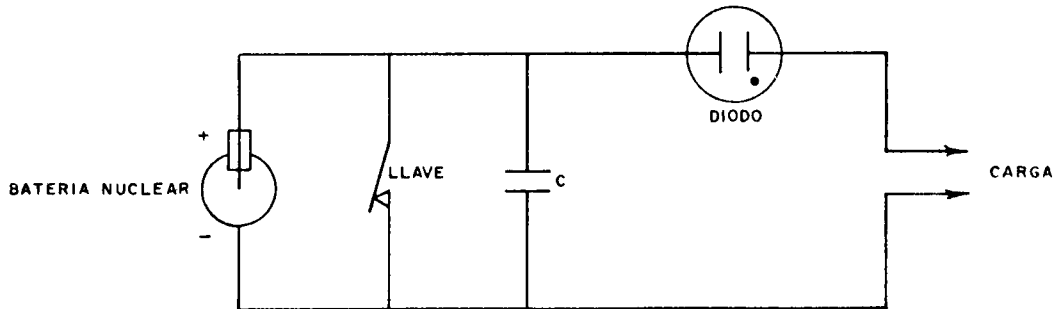


Fig. 13. Circuito de disparo con retardo, alimentado con una batería nuclear.

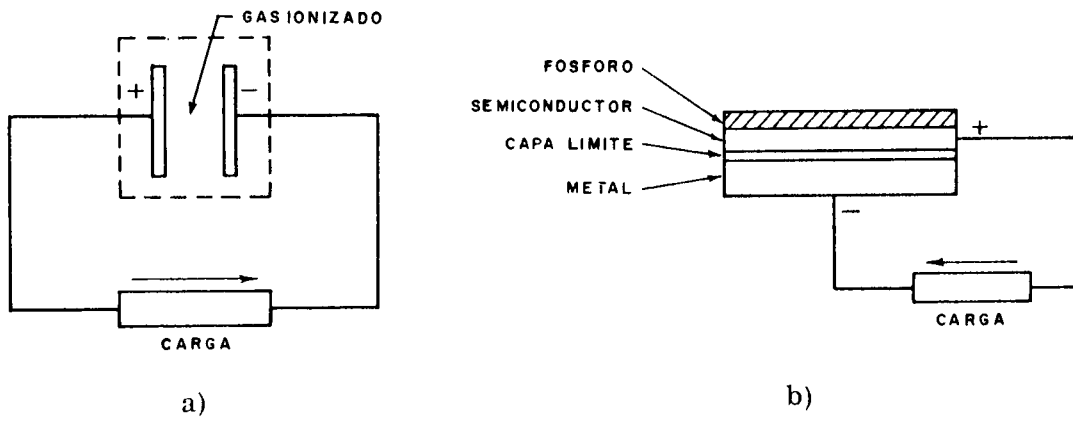


Fig. 14. Baterías nucleares basadas en la ionización y excitación.
a) potencial de contacto; b) fotovoltaica.

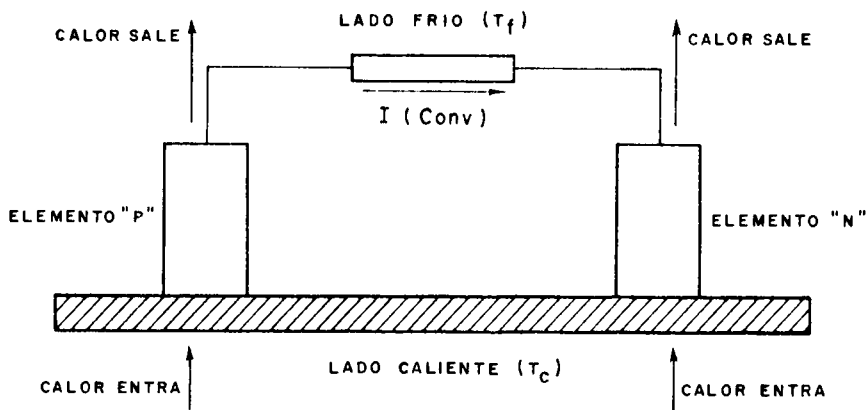


Fig. 15. Principio de conversión termoeléctrica.

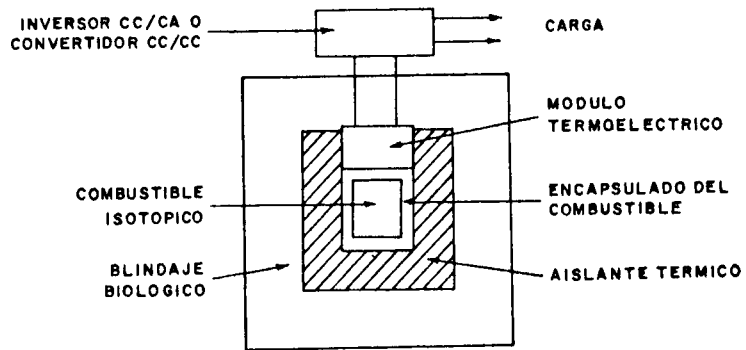


Fig. 16. Construcción básica de un generador isotópico termoelectrico.

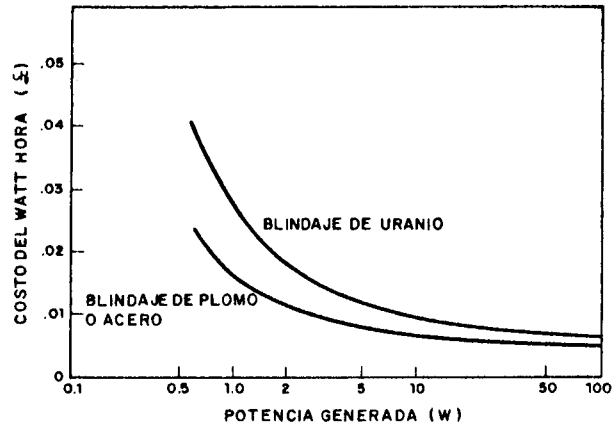


Fig. 17. Costo estimado el wathora eléctrico para generadores isotópicos de ^{90}Sr suponiendo un precio de 0,125 £/curie ^{90}Sr .

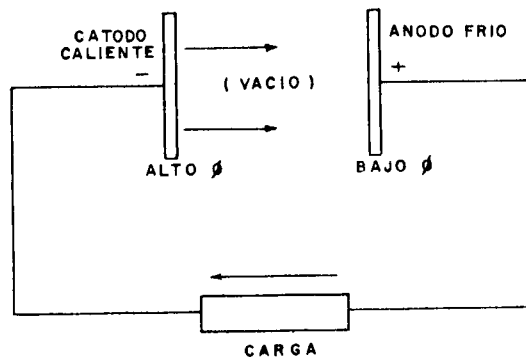


Fig. 18. Principio del convertidor termoiónico.

