

TUBOS DE RAYOS CATODICOS

Introducción.

El tubo de rayos catódicos (TRC o CRT) es una válvula o tubo electrónico en el que un haz de electrones se enfoca sobre un área pequeña de una superficie emisora de luz que constituye la pantalla y cuya intensidad y posición sobre ella pueden variarse. Originalmente se conoció como “tubo de Braun”¹. El tubo de rayos catódicos tiene su origen en el “tubo de Crookes”², una forma primitiva de un tubo de descarga de baja presión, cuyo cátodo era un disco plano de aluminio en un extremo del tubo y el ánodo un alambre en uno de los lados del tubo, fuera de la zona del haz electrónico. El tubo se utilizó para estudiar los rayos catódicos.

En televisión, el tubo de rayos catódicos se designa frecuentemente como *tubo de imagen* o simplemente como *pantalla* y tiene características particulares para esta aplicación, distintas a las de los tubos de rayos catódicos utilizados en los osciloscopios, en particular su forma, dimensiones y método de deflexión del haz electrónico.

En el tubo de rayos catódicos, un *cañón electrónico* produce y confina un haz de electrones que envía hacia una pantalla recubierta de material luminiscente, de forma que cuando los electrones chocan contra ella emite luz cuya intensidad o brillo, es proporcional a la cantidad y velocidad de los electrones incidentes. En otras palabras, la energía cinética del haz electrónico se transfiere al material de la pantalla convirtiéndose en energía luminosa. Entre el cañón electrónico y la pantalla se tiene un sistema deflector constituido por bobinas colocadas en el exterior del tubo, para desviar el haz electrónico horizontal y verticalmente. A diferencia del sistema de deflexión magnética usado en televisión, los osciloscopios emplean deflexión electrostática, desviando el haz electrónico mediante placas horizontales y verticales colocadas en el interior del tubo. El brillo puede variarse, si se varía la densidad del haz electrónico mediante una rejilla de control, cuya acción es similar a la que se tiene en un triodo u otras válvulas como el tetrodo o el pentodo.

En el caso de televisión monocromática, la pantalla está recubierta de un tipo de material homogéneo que emite luz de un solo color. Los tubos de imagen para televisión en color funcionan bajo el mismo principio, excepto que la pantalla está recubierta de diferentes tipos de material fosforescente que emite luz de diferentes colores al recibir el impacto del haz electrónico y están distribuidos sobre la superficie pantalla en forma de pequeños puntos contiguos. Los colores corresponden a los primarios utilizados en televisión, es decir, rojo, verde y azul. Puede decirse que un tubo de imagen de color está constituido por tres tubos monocromáticos en una misma ampolla de vidrio; así, en un tubo de color el cañón electrónico está formado de hecho, por tres cañones individuales que producen tres haces electrónicos de modo que cada uno de éstos impacta sobre el material fosforescente de cada uno de los colores primarios. Cuando sobre los tres puntos fosforescentes contiguos de diferentes colores, inciden los tres haces electrónicos con la misma intensidad, la pantalla emite luz blanca y las diversas mezclas de colores se consiguen variando la intensidad de los correspondientes haces electrónicos que inciden sobre cada punto de un color particular. La intensidad o brillo se controla variando el número de electrones en los haces electrónicos respectivos. Para asegurar que cada haz electrónico incide sobre un punto de un color particular se emplean varias técnicas. Una de ellas consiste en colocar una máscara perforada, designada también como máscara de apertura o máscara de sombra, inmediatamente antes de la superficie de la pantalla, de forma tal que las perforaciones queden alineadas con las triadas de puntos cromáticos, de forma tal que cada haz electrónico pueda “ver” solamente el punto correspondiente a su color. Este tema se tratará con alguna amplitud más adelante.

¹ En honor de Karl Ferdinand Braun, físico alemán que realizó investigaciones sobre los rayos catódicos y telegrafía inalámbrica y fue Premio Nobel en 1909.

² William Crookes, físico y químico inglés, inventor del tubo de Crookes para estudiar las descargas eléctricas en el vacío así como de un radiómetro. Descubrió además el talio.

1. Cañón electrónico.

En la figura 1 se ilustra un tubo de rayos catódicos y la posición del cañón electrónico, en la parte trasera del tubo, opuesta a la pantalla.

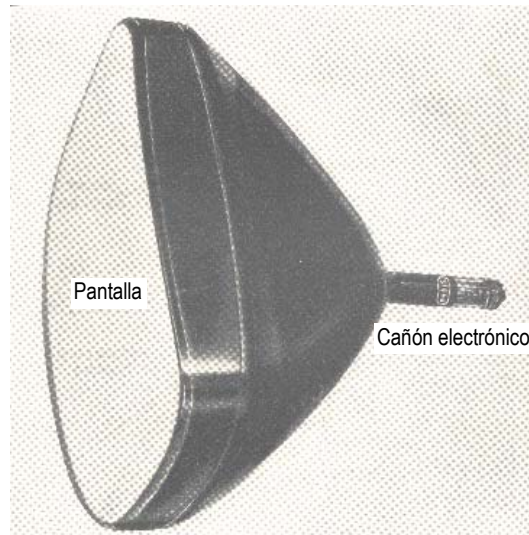


Fig 1. Tubo de rayos catódicos para televisión.

El cañón electrónico contiene el cátodo emisor, rejilla de control y electrodos aceleradores y de enfoque del haz electrónico, designados generalmente como sistema de lentes electrónicas.

Con la excepción de los cañones electrónicos en los tubos de cámara, casi todos los cañones empleados en televisión se basan en el principio de dos lentes consistentes en una fuente de electrones termoiónicos, una primera lente, generalmente electrostática y una segunda lente que puede ser electrostática, magnética o una combinación de ambas³.

En la primera lente se encuentra el cátodo, la rejilla de control y el primer ánodo. El cátodo es de calentamiento indirecto y tiene la forma mostrada en la figura 2. En el interior de un manguito cilíndrico de níquel se encuentra el filamento calefactor y el cátodo, es decir la superficie emisora propiamente dicha, en un disco sobre la cara plana del cilindro en dirección a la pantalla.

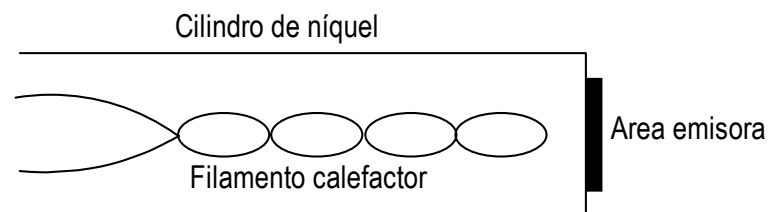


Fig. 2. Estructura del cátodo en un tubo de rayos catódicos.

³ Para un tratamiento riguroso del tema de lentes electrónicas consúltese por ejemplo: Zworykin, V. K and Morton, G. A. "Television", 2nd Ed. John Wiley and Sons, Inc. New York, 1954. Capítulos 4 y 12. También Hemenway, C. L., Henry, R. W. and Caulton, M. "Física Electrónica". Editorial Limusa. México. 1973.

La reja de control no es de la forma habitual que se encuentra en los triodos u otras válvulas de vacío. En este caso es un cilindro metálico, con un pequeño orificio a través del que pueden pasar los electrones. Esta configuración ayuda a reducir el área efectiva del cátodo a la vez que permite la configuración del haz electrónico en esa zona, como consecuencia del campo eléctrico entre la reja y el cátodo. A continuación de la reja y separada de ésta por un pequeño espacio, se localiza el primer ánodo en el que mediante paredes cuidadosamente ajustadas se controla y configura el haz electrónico hacia la pantalla. La estructura de la primera lente así configurada se muestra esquemáticamente en la figura 3.

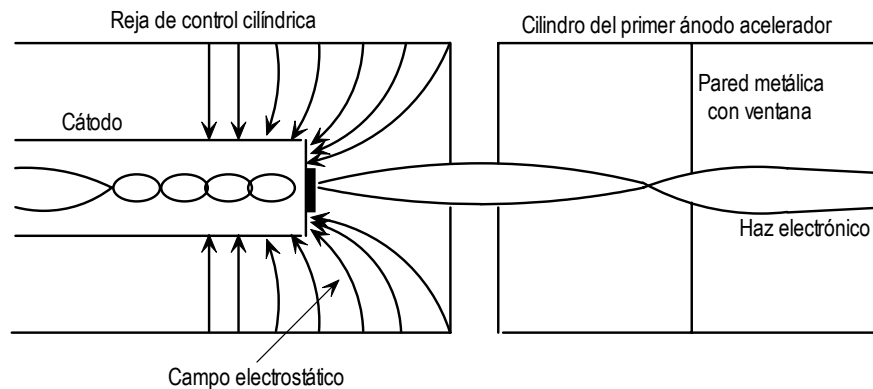


Fig. 3. Estructura esquemática de la primera lente

En ausencia de campos eléctricos, los electrones abandonan el cátodo con baja velocidad y forman una nube electrónica o carga de espacio en la zona entre el cátodo y la reja. Esta carga de espacio actúa como repulsor para los nuevos electrones emitidos por el cátodo y se alcanza una condición de equilibrio. Si se aplica un voltaje positivo, relativamente elevado, al primer ánodo, se establece un campo eléctrico en el espacio a su alrededor que arrastra a los electrones a través del orificio en el cilindro de la reja de control, conformándose un haz electrónico de sección circular y en la forma aproximada que se indica en la figura 3. La curvatura longitudinal de los bordes del haz está determinada por la distancia entre el primer ánodo y la reja de control, así como por el voltaje de este último. Los electrones del haz convergen en un punto en el interior del cilindro de la primera lente y luego nuevamente se separan. Este punto, situado en el eje del cañón electrónico y del tubo de rayos catódicos se designa como *punto de cruce* y puede considerarse que actúa como un cátodo virtual de muy pequeñas dimensiones⁴. La cantidad de electrones que pasan hacia el primer ánodo depende del voltaje aplicado a la reja de control que, si es suficientemente negativo, impedirá el paso de cualquier electrón hacia la pantalla. La perforación o ventana en el primer ánodo sirve para conformar el haz electrónico, junto con la segunda lente, en la región entre éstas y la pantalla, a fin de que nuevamente converja en un punto sobre la pantalla.

La posición del punto de cruce puede variar como consecuencia de los voltajes del primer ánodo y de la reja de control, así como de la densidad del haz electrónico en la zona del primer ánodo y tiene efectos sobre el enfoque del haz en la pantalla. Una forma de ajustar el enfoque de la imagen es, por consecuencia, variar el voltaje del primer ánodo.

⁴ La descripción que se hace aquí, aunque se estima suficiente para comprender los principios de funcionamiento del cañón electrónico, es muy simplificada y se reduce a los aspectos básicos. Los interesados en el análisis riguroso del funcionamiento de las lentes electrónicas pueden consultar el texto de Zworykin y Morton mencionado en la nota (3)

La segunda lente está constituida también por un cilindro metálico de diámetro algo mayor que la primera y separada de ésta, en la forma que se ilustra en la figura 4. Su función es la de extraer los electrones del punto de cruce o cátodo virtual, acelerarlos y enfocarlos sobre la pantalla. El voltaje aplicado al segundo ánodo es positivo respecto al cátodo y mayor que el del primer ánodo.

Los electrones que emergen del primer ánodo no viajan todos paralelos al eje del tubo y el haz tiende a ser divergente. Aún cuando el ángulo de divergencia sea pequeño, el rastro sobre la pantalla no sería un punto y la imagen resultaría desenfocada. El campo producido por el potencial aplicado al segundo ánodo obliga nuevamente a los electrones a converger en un nuevo punto de cruce, ahora mucho más lejano y sobre la pantalla del tubo de rayos catódicos.

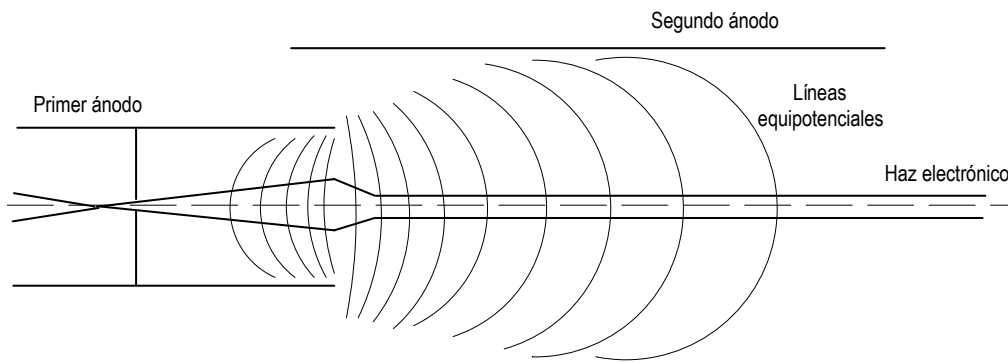


Fig. 4. Sistema de la segunda lente

El funcionamiento de la segunda lente depende de los diferentes potenciales aplicados al primero y segundo ánodos y de la distribución del campo eléctrico resultante. En la figura 4 se muestran las líneas equipotenciales para esta lente y es conveniente hacer notar que su curvatura cambia en la intersección de los dos ánodos. Del lado izquierdo son convexas respecto al haz electrónico incidente, en tanto que a la derecha de la intersección son curvas, con lo que se producen efectos opuestos sobre el haz. La configuración de las líneas, o más propiamente, superficies equipotenciales en la zona del segundo ánodo es hacer converger nuevamente a los electrones del haz. La relación entre los voltajes del primero y segundo ánodo, así como el tamaño de los respectivos cilindros y la relación entre sus diámetros es la que determina la curvatura y distribución de las líneas de fuerza y de las superficies equipotenciales. El voltaje del segundo ánodo respecto al primero se sitúa en una relación que va de 3:1 a 6:1.

Enfoque magnético

En las secciones anteriores se trató el papel que desempeñan el primero y segundo ánodos en el enfoque del haz electrónico sobre la superficie de la pantalla. Sin embargo, el ajuste del punto de cruce en el interior del primer ánodo no suele ser suficiente para evitar la dispersión de una parte de los electrones fuera del haz, dando como resultado o bien un enfoque pobre, o una disminución de la intensidad luminosa de la pantalla. Para mejorar la convergencia del haz sobre la pantalla se utilizan imanes fijos o bobinas de enfoque alimentadas con corriente continua y colocadas en el exterior del cañón electrónico, adelante del primer ánodo en dirección a la pantalla.

La función de la primera lente se mantiene esencialmente igual a como se describió en las secciones anteriores, haciendo converger los electrones en el punto de cruce. A partir de este punto, la sección transversal del haz vuelve a ensancharse y los electrones divergen del eje del tubo. Es entonces cuando el campo magnético producido por las bobinas de enfoque o los imanes permanentes juega un papel importante para mantener el haz colimado y por tanto, puede decirse que el sistema de enfoque forma parte de la segunda lente.

El campo magnético producido por el sistema externo de enfoque, es paralelo al eje del tubo, de modo que los electrones que emergen del punto de cruce o cátodo virtual viajen paralelamente al eje del tubo, el campo externo no interfiere con ellos. Sin embargo, los electrones con trayectorias divergentes al eje entran al campo con trayectorias oblicuas y son sometidos a una fuerza que los hace seguir una trayectoria helicoidal, cuyo diámetro y paso dependen básicamente de la velocidad de los electrones y de la intensidad del campo magnético. La fuerza circular a que se ven sometidos los electrones les obliga a moverse alrededor del eje del tubo en dirección a la pantalla. Ajustando adecuadamente la intensidad del campo magnético, es posible hacer que los electrones dispersos vuelvan al eje del tubo precisamente en la superficie de la pantalla, convergiendo con el centro del haz.

Cuando se usan imanes fijos, se colocan sobre un anillo en el exterior del cañón electrónico. Suelen usarse tres o cuatro imanes equiespaciados sobre el anillo, en el primer caso a 120° y a 90° en el segundo.

Trampa de iones.

Un aspecto de importancia considerable en los tubos de rayos catódicos es el de impedir que los iones producidos en el interior del tubo, ya sea por el vacío imperfecto de la ampolla de vidrio, o porque los metales en el interior liberan iones, alcancen la pantalla. Los iones negativos, al tener la misma carga que los electrones son acelerados igual que éstos hacia la pantalla, sin embargo, al ser considerablemente más pesados que los electrones, pueden destruir el recubrimiento de aquélla. En el caso particular de la deflexión magnética, los iones pesados no sufren la misma deflexión que los electrones y tienden a chocar en el centro de la pantalla destruyendo el material fotoemisor de ésta y dando como resultado un punto negro incapaz de emitir luz.

La producción de iones en el tubo de rayos catódicos es inevitable, pero pueden emplearse técnicas que impidan que estos iones lleguen a la pantalla. Una de estas técnicas utiliza cañones inclinados, como se muestra en la figura 5.

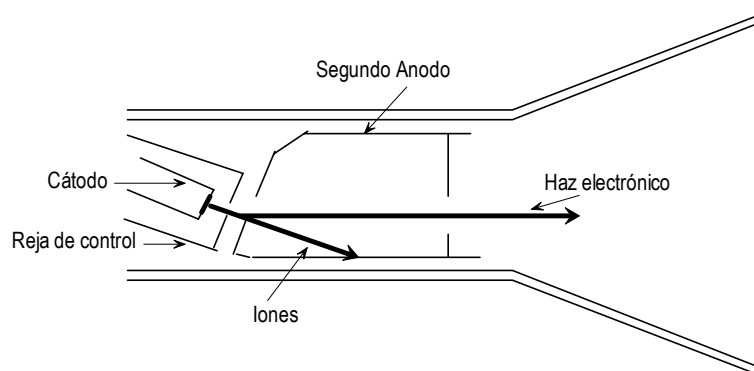


Fig. 5. Trampa de iones con cañón inclinado.

En esta técnica, el cátodo está inclinado respecto al eje del tubo y tanto los iones como los electrones viajarán en trayectorias rectas. Sin embargo el campo eléctrico que produce el segundo ánodo, hace que los electrones, más ligeros, modifiquen su trayectoria en la dirección deseada del haz, en tanto que los iones, más pesados no se desvían con la misma rapidez y chocan con el cilindro metálico del segundo ánodo siendo absorbidos por éste y evitando que alcancen la pantalla. Para reforzar este efecto, suele colocarse un imán externo cuya función es desviar, tanto los electrones como los iones. Sin embargo, debido a la mayor masa de éstos la desviación es menor y terminan chocando contra el metal del segundo ánodo.

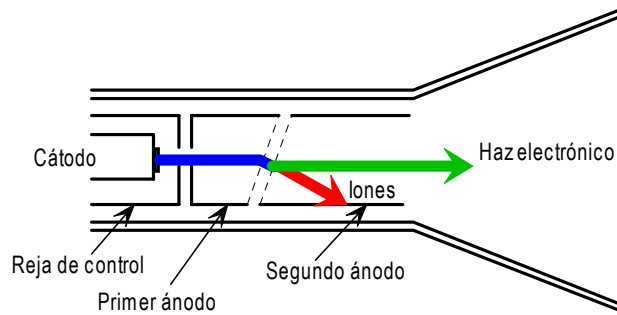


Fig. 6. Trampa con corte diagonal en el cañón electrónico.

Otra técnica para desviar los iones e impedir que lleguen a la pantalla, es que emplea cortes diagonales en el primero y segundo ánodos como se muestra en la figura 6. En este caso, el campo eléctrico producido entre el primero y el segundo ánodos desvía el haz que contiene tanto electrones como iones más pesados. El efecto es similar al descrito para el caso anterior, nuevamente con la ayuda de un campo magnético externo.

Las técnicas anteriores estuvieron en uso mucho tiempo. Sin embargo, actualmente la mayoría de los tubos de imagen utilizan otro procedimiento para impedir que los iones alcancen la pantalla, que consiste en colocar en el interior de ésta una película de aluminio extremadamente delgada, de tal forma que permite el paso de los electrones, pero impide el de los iones, al mismo tiempo que impide que la luz emitida por el material luminiscente de la pantalla se refleje al interior del tubo, haciendo que toda la luz se emita hacia el frente. La razón de que los iones queden atrapados por esta película de aluminio radica en la profundidad de penetración de una partícula, que obedece la siguiente relación:

$$\delta = \frac{KV_e}{m}$$

donde δ es la profundidad de penetración, que no debe confundirse con la relacionada con el efecto pelicular (skin), K es una constante que depende del material con el que choca la partícula, V_e es la energía de la partícula y V su masa.

Como los iones tienen una masa considerablemente mayor que los electrones, su profundidad de penetración es menor y quedan atrapados por la película metálica sin alcanzar el material luminiscente de la pantalla. La tendencia en las últimas décadas ha sido la de aluminizar todas las pantallas y, en la mayoría de los casos eliminar la trampa de iones, particularmente en los cañones de corta longitud.

Problemas de brillo y contraste en los tubos de imagen⁵

El principal objetivo en el diseño de un tubo de rayos catódicos para televisión es la producción de una imagen con buen brillo y elevado contraste. Cuando el haz electrónico choca contra el lado interior del tubo recubierto de material luminiscente, la luz emitida se distribuye aproximadamente de la siguiente forma:

→ 50% se refleja hacia el interior del tubo.

⁵ El material de esta sección está basado en buena parte en el texto “*Television Simplified*”, 7ª Edición, de M. S. Kiver y M. Kaufman, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1962.

- 20% se pierde por reflexión interna en el propio cristal del tubo.
- 30% se emite hacia la parte frontal donde se sitúa el observador.

Como se aprecia de las cifras aproximadas anteriores, el proceso es muy poco eficiente ya que sólo la tercera parte de la luz emitida llega al observador y, además, el contraste se ve degradado a causa de la luz que se refleja de nuevo a la pantalla después de haber alcanzado otros puntos en el interior del propio tubo. Algunas de estas causas de interferencia en orden de importancia son la formación de halos o *halación*, las reflexiones debidas a la curvatura de la pantalla, las reflexiones en la propia superficie de la pantalla y las reflexiones procedentes del interior del propio tubo.

La formación de halos es debida a la dispersión de luz alrededor de los puntos emisores impactados por el haz electrónico, en forma de anillos alrededor de dichos puntos. La luz que emite el material luminiscente depositado en el interior del tubo penetra en el vidrio y se refracta, sufriendo una nueva refracción al pasar del vidrio al aire, como se ilustra en la figura 7.

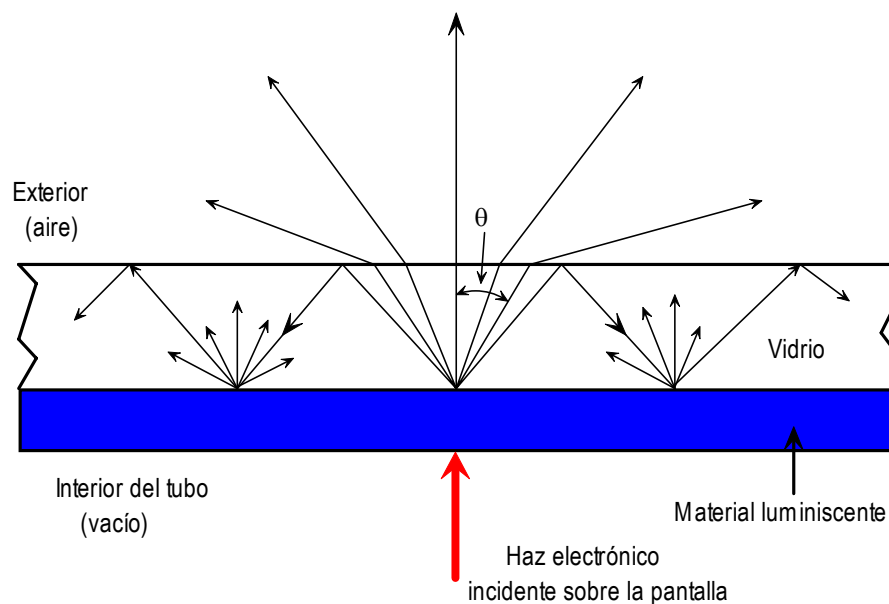


Fig. 7. Reflexiones internas causantes de la formación de halos.

Los rayos luminosos que inciden sobre la superficie vidrio-aire a un ángulo mayor que θ se reflejan de nuevo al interior y, en cada punto en el que inciden sobre la superficie de material luminiscente se dispersan, produciendo anillos o halos alrededor del punto original. Estos halos son de dimensiones muy reducidas y pueden apreciarse con un lente de aumento suficiente; sin embargo son suficientes para producir un cierto resplandor que hace borroso el punto emisor original sobre el que incide el haz electrónico. Este efecto tiene como consecuencia una reducción en el máximo detalle del contraste. El contraste es la relación entre el brillo de dos puntos adyacentes, de modo que si el haz electrónico incide completamente sobre un punto de la pantalla y se corta en el siguiente (negro), la dispersión producida por el fenómeno de halación hará que este último no se vea completamente negro, lo que resulta en pérdida de calidad en los bordes de una imagen. O otras palabras, las áreas de una imagen que debieran ser totalmente oscuras recibirán cierta cantidad de luz reduciéndose la relación de contraste.

Las reflexiones debidas a la curvatura de la pantalla se ilustran en la figura 8 y también dan lugar a reducción del contraste. La solución a este problema es el empleo de pantallas planas en cuyo desarrollo se ha progresado considerablemente

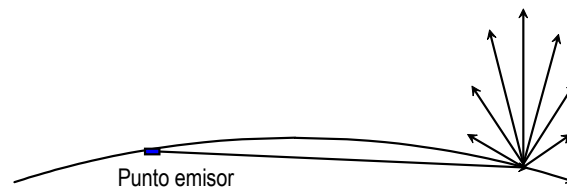


Fig. 8. Reflexión debida a la curvatura de la pantalla.

Los rayos luminosos reflejados hacia el interior del tubo representan una pérdida de energía luminosa en la dirección frontal y, además pueden reflejarse nuevamente por las paredes del tubo incidiendo sobre la pantalla. Este tipo de reflexión interna puede reducirse con una geometría adecuada del tubo para reducirlas. Sin embargo, la técnica más adecuada, ya mencionada en la sección anterior es la de utilizar una película metálica muy delgada que impida la reflexión hacia el interior y que además, actúa como trampa de iones.