



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**EFFECTOS NO LINEALES EN DETECTORES
OPTICOS DE POSICION**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

FISICO

PRESENTA

CARLOS RAUL MONTAÑO ESPINOSA

2001

MEXICO, D. F.



2001



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



**EL PRESENTE TRABAJO SE IMPRIMIÓ CON EL APOYO DE
LA COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA**



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

M. EN C. ELENA DE OTEYZA DE OTEYZA
Jefa de la División de Estudios Profesionales de la
Facultad de Ciencias
Presente

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo de Tesis:
"Efectos no lineales en detectores ópticos de posición"

realizado por MONTAÑO ESPINOSA CARLOS RAUL

con número de cuenta 8033558-2 , pasante de la carrera de Física.

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis
Propietario

FIS. ANGEL ARTURO NOGUEIRA JIMENEZ

Propietario

DR. ELFEGO GUILLERMO RUIZ SCHNEIDER

Propietario

DR. ROBERTO ORTEGA MARTINEZ

Suplente

FIS. RENE ORTEGA ALVARADO

Suplente

FIS. JUAN AMERICO GONZALEZ MENENDEZ

[Handwritten signatures: Angel Arturo Nogueira Jimenez, Elfego Guillermo Ruiz Schneider, Roberto Ortega Martinez, Rene Ortega Alvarado, Juan Americo Gonzalez Menendez]

Consejo Departamental de Física



[Handwritten signature: Patricia Goldstein Menachem]

DRA. PATRICIA GOLDSTEIN MENACHEM
Coordinadora de Licenciatura

Agradezco al M. en C. Ángel Arturo Nogueira Jiménez, su invaluable ayuda en la dirección de este trabajo y su gran apoyo para verlo culminado.

Agradezco a Dr. Elfego Guillermo Ruíz Schneider, Dr. Roberto Ortega Martínez, Fís. René Ortega Alvarado y Fís. Juan Américo González Menéndez, sus comentarios y correcciones al contenido de este trabajo.

Agradezco al Fís. Jorge Andrade Herrera su apoyo al permitir utilizar su programa de "Mapas de líneas de campo eléctrico y equipotenciales" para simular parte del modelo propuesto, así como sus comentarios al trabajo experimental.

Dedico este libro

Con amor; a mi esposa, Angélica Isabel Jover de Montaña, quien siempre ha estado a mi lado brindándome amor y fortaleza para lograr mis objetivos. Gracias por tu paciencia y tus días de desvelo.

A mis padres, Lic. Carlos Raúl Montaña Hernández y Lucila Espinosa de Montaña, quienes siempre me han brindado todo su apoyo y cariño para lograr esta nueva meta, ver terminada mi segunda carrera profesional.

A mi hermano Roberto y mis hermanas, Lilian y Gisela, gracias por su apoyo y amor fraternal.

ÍNDICE

Resumen	1
Introducción.....	3
Capítulo 1. DETECTORES ÓPTICOS	
1.1. Definiciones generales	7
1.2. Detector óptico de posición de efecto lateral	
1.2.1. Operación.....	11
1.2.2. Estructura del detector de posición de efecto lateral.....	13
1.2.3. Ecuaciones de conversión	13
1.3. Mepsicrón	14
Capítulo 2. EQUIPOTENCIALES EN SUPERFICIES	
2.1. Definiciones preliminares	
2.1.1. Campo eléctrico	20
2.1.2. Líneas de fuerza, potencial eléctrico y equipotenciales	21
Capítulo 3. MODELOS GEOMÉTRICOS Y EXPERIMENTAL DEL DETECTOR ÓPTICO DE POSICIÓN DE EFECTO LATERAL	
3.1. Antecedentes.....	26
3.2. Modelos geométricos.....	28
3.3. Comportamiento de la disposición geométrica de los electrodos y fronteras.....	33
3.4. Equipo para observar equipotenciales	35
3.5. Resultados experimentales	39

Capítulo 4. CORRECCIÓN DE LA RESPUESTA NO-LINEAL

4.1. Nueva disposición de electrodos y geometrías de fronteras	44
4.2. Modelo matemático de equipotenciales	46
4.3. Detección del haz	51
CONCLUSIONES GENERALES.....	53
APÉNDICES	
A) Medición del área de respuesta efectiva	56
B) Condiciones a la frontera sobre el campo eléctrico	59
C) Cálculo de la resolución de la posición	62
REFERENCIAS.....	64
BIBLIOGRAFÍA	66

Resumen

Para resolver los problemas de detección de la luz en imágenes ópticas débiles, se han desarrollado sensores para bajos niveles de iluminación. Entre estos dispositivos electrónicos; se encuentran el detector de adquisición de imágenes por conteo de fotones, también conocido como Mepsicrón (Multi Electron Position Sensor Image¹) y el detector sensible a haces luminosos para determinar la posición, conocido como detector óptico de posición de efecto lateral (DOPEL). En estos instrumentos, la posición del haz y del fotón incidentes en la superficie detectora están determinados por el centroide de la distribución de corrientes generadas en la superficie fotosensible y resistiva respectivamente.

Si se compara este resultado con las equipotenciales de un modelo, inclusive de mayores dimensiones pero de la misma geometría que la del detector, se observa que el comportamiento de la distancia entre líneas equipotenciales sobre una línea de campo, es el mismo que sigue la respuesta del detector, esto es, la respuesta no es lineal en toda la superficie. El caso del detector de adquisición de imágenes por conteo de fotones, presenta el mismo problema de alinealidad.

El comportamiento de las trayectorias que siguen las corrientes generadas en el punto de incidencia de las superficies conductoras hacia los electrodos son dependientes de las diversas geometrías de este espacio de conducción. Para poder estudiar este comportamiento, se hace necesario el uso de modelos geométricos físicos de la superficie resistiva, que permitan la representación gráfica de las líneas de campo y equipotenciales.

El objetivo del presente trabajo de tesis, consiste en la caracterización y evaluación de la respuesta del DOPEL, de los efectos obtenidos por las corrientes generadas en el punto de incidencia de las superficies conductoras hacia los electrodos y la disminución del efecto no-lineal en la posición del haz mediante el

¹ La terminación cron en la palabra Mepsicrón se refiere a tiempo, es decir la adquisición de imágenes por conteo de fotones depende del tiempo transcurrido.

análisis experimental de la superficie con la ayuda de modelos matemáticos y físicos (c.f. cap. 4.1). Este último, consiste en un gel sobre el cual se colocan electrodos, de forma tal que se pueda simular el comportamiento de las equipotenciales en los detectores, modificando la curvatura de estas líneas por medio del cambio de la geometría de las fronteras y la distribución de los electrodos.

Introducción

La aplicación de los fotodetectores para determinar la posición se ha expandido muy rápidamente en el área de instrumentación electro-óptica, para la medición de ángulos, distancias, alturas, centrado de haces, uniformidad de superficies y otros parámetros relacionados con mediciones de posición. Estos dispositivos tienen una amplia gama de aplicaciones, entre ellas se encuentra el estudio del comportamiento de las superficies de detectores ópticos, espectrometría de bajo nivel, análisis de espectros de energía de partículas cargadas, experimentos de radiación y física de partículas; en biología, han sido utilizados para la medición de la curvatura de la cornea^[1], observación de objetos astronómicos muy lejanos o poco brillantes^[2]; su aplicación en este caso es extensa ya que ha cubierto disciplinas tales como fotometría, espectroscopia, interferometría y polarimetría, así como detección de imágenes con rayos X de diversas energías. En las siguientes líneas se mencionarán algunas de estas aplicaciones y algunos tipos de fotodiodos detectores de posición, entre los que se incluye el de efecto lateral.

Un sistema electro-óptico para calibración; consiste en un láser de posición fija (Figura 1), un sistema de espejos y un fotodiodo receptor, el cual colecta la luz reflejada a fin de proveer una señal de salida proporcional a la posición.

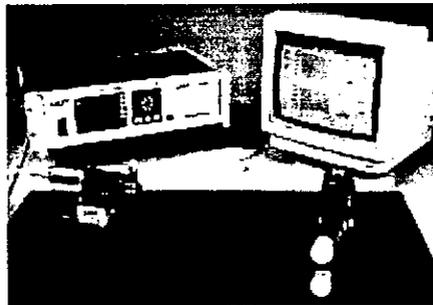


Figura 1. Sistema electro-óptico de fotodetección.

La Figura 2, muestra una instalación para la localización lateral de un objeto fijo sobre una superficie de prueba. Este sistema puede, además, medir la posición angular. En la industria biofísica y robótica, se efectúan análisis de movimiento mediante el uso de varios arreglos multiplexados similares. Por ejemplo en la industria del escaneo de imágenes con herramientas OCR (optical character recognition), se hace uso de sistemas semejantes para medir la calidad de alineación de una serie de espejos. En el manejo de rayos láser, se utilizan arreglos análogos para determinar la alineación del rayo.

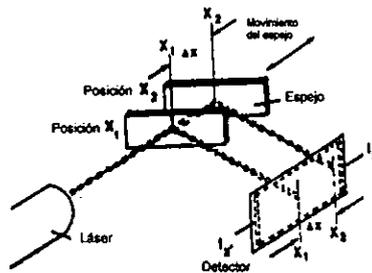


Figura 2. Configuración de una instalación de un fotodetector utilizado para medir la calidad de alineación de una serie de espejos. El trabajo fundamental de los espejos es enfocar el Láser entre las marcas de referencia, X_1 y X_2 . El rayo del Láser pasa a través de un espejo con superficie de policarbonato, la luz se refleja en la capa de Aluminio y regresa a un dispositivo óptico-electrónico que detecta el cambio de la luz. Las marcas reflejan la luz diferente en lo llano (el resto de la capa de aluminio) y el sensor óptico-electrónico detecta tal cambio en el reflejo.

El concepto tradicional de detector de posición, se basa en un arreglo de fotodiodos en una o dos dimensiones conocido como multielemento. Un punto de luz sobre el arreglo, induce foto ocurrencia en el elemento iluminado. Todos los elementos en el arreglo sirven para determinar la posición del punto de incidencia del haz lumínico. Sin embargo, este tipo de arreglos tienen dos desventajas:

1. Su resolución está determinada por el tamaño de un pixel; por lo tanto
2. El tamaño del punto luminoso debe ser menor que el del pixel. Si el punto luminoso es mayor, se debe localizar la posición del centroide mediante la medición de muchos elementos adyacentes. Empero, esto incrementa el costo y la complejidad del análisis de datos.

Los detectores ópticos de posición de efecto lateral; son un caso especial de fotodetector (c.f. cap. 1.2.2) los cuales son utilizados en aplicaciones en las que se requieren mediciones sobre un amplio rango de posiciones; además de una alta resolución y linealidad. Estos detectores difieren de los de cuadrante y de arreglo, en que utilizan solamente un solo fotodiodo con capacidad de fotodetección continua, eliminando con ello regiones de no-detección, las cuales existen entre cada celda en los otros tipos de fotodetectores.

En los detectores de efecto lateral, la posición se obtiene mediante la división de los electrones fotogenerados dentro del sustrato (región N), en lugar de determinar la distribución de la corriente en la superficie. Así, los diodos detectores de efecto lateral actúan como un par de resistencias variables controladas por luz, con el fin de determinar la posición del punto de incidencia del haz de luz en el plano cartesiano.

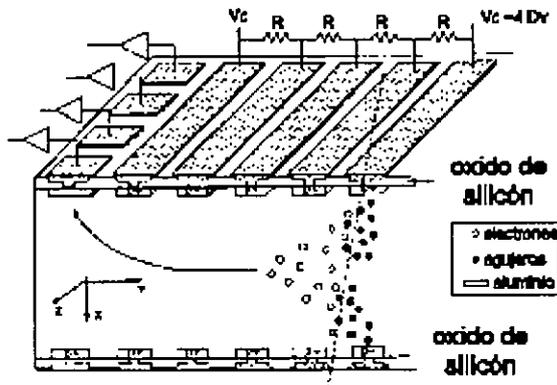


Figura 3. En los detectores de efecto lateral, la posición se obtiene mediante la división de los electrones fotogenerados dentro del sustrato (región N). Los electrones formados por la radiación ionización son enviados a un potencial mínimo cerca del centro de la retícula. Luego son transportados en forma paralela a la superficie por un gradiente de potencial entre la superficie y son colectados en un ánodo cerca del borde de la retícula.

Estos fotodetectores, en especial los detectores de efecto lateral, tienen una buena resolución en la determinación de la posición del haz, pero esta depende del tamaño del elemento y el diámetro del punto luminoso. Además, el rango dinámico está limitado por la función de transferencia del diodo, la cual es lineal solamente alrededor del centro de movimiento, es decir, *la posición del haz*

y del fotón incidente, en la superficie detectora, está determinada por el centroide de la distribución de corrientes generadas en la superficie fotosensible y resistiva respectivamente.

En el presente trabajo se analiza experimentalmente el comportamiento de las trayectorias que siguen las corrientes generadas en el punto de incidencia de las superficies conductoras del detector óptico de posición de efecto lateral hacia los electrodos, las cuales dependen de las diversas geometrías del espacio de conducción, fronteras y la distribución de los electrodos. Para poder estudiar este comportamiento, se recurre al diseño de modelos geométricos físicos de la superficie resistiva, que permitan representar gráficamente las líneas de campo y equipotenciales. Mediante la caracterización y evaluación de la respuesta de estos detectores, de los efectos obtenidos al tener corrientes generadas en el punto de incidencia de las superficies conductoras hacia los electrodos y el análisis de la forma en como se comparten las líneas equipotenciales; se permitirá, en lo posible, disminuir los efectos de no-linealidad en la posición del haz.

Capítulo 1. DETECTORES ÓPTICOS.

Para la mejor comprensión de los detectores ópticos de efecto lateral, en primer lugar, deben ser definidas las bases teóricas mínimas para su comprensión así como los elementos esenciales que los constituyen. Esta es una de las finalidades de este capítulo introductorio, donde se establecen las bases conceptuales para su futura caracterización y análisis respecto a la linealidad de su respuesta.

El capítulo se divide en tres secciones. En la primera se presentan las definiciones generales, las cuales son esenciales en la ulterior realización del trabajo; así como las particularidades del fotoconductor. En la segunda, se indican las características y operación de los detectores ópticos en general para posteriormente, presentar el caso particular de los detectores ópticos de posición de efecto lateral (DOPEL). La tercera, muestra una descripción del caso espacial del detector de adquisición de imágenes por conteo de fotones, el cual ha tenido aplicación en muchas ramas de la física.

1.1. Definiciones generales.

Detector de Radiación Óptica.- Dispositivo en el cual incide radiación óptica, que produce un efecto físico factible de ser medido; el cual puede ser una señal eléctrica, un incremento en la temperatura, la contracción o expansión de un gas, etc.

Detector fotoeléctrico.- Es un detector de radiación óptica el cual utiliza la interacción entre la radiación y la materia dando como resultado la absorción de fotones y la liberación de electrones a partir de sus estados iniciales, excluyendo fenómenos eléctricos causados por cambios de temperatura. Este tipo de detectores son usados, para medidas prácticas en el campo de la radiación óptica. Comprende los detectores fotoemisivos y los de semiconductores. Este dispositivo está construido con base en semiconductores en el cual el efecto

fotoeléctrico se produce en las fronteras de una unión p-n (p-n-p ó n-p-n) y que tiene propiedades de amplificación.

Entrada del fotodetector.- Cantidad radiométrica o fotométrica que el detector utilizará para medir o detectar. Esta cantidad puede ser, por ejemplo el flujo radiante, irradiancia, luminiscencia o el valor de una cantidad integrada sobre un periodo específico.

Salida del fotodetector.- Cantidad física, por lo general es una corriente eléctrica, producida por el detector como respuesta a la radiación incidente. Su símbolo es I_{ph} .

Corriente oscura.- Corriente que fluye en el fotodetector en ausencia de irradiación. Si se aplica un voltaje inverso (V_R) al detector en la oscuridad, fluirá una pequeña corriente. Esta corriente es llamada "corriente oscura" y se ve afectada por la temperatura y el tamaño de la estructura del detector. Símbolo I_0 .

Linealidad del fotodetector de posición.- Propiedad que tiene la respuesta del detector de ser proporcional a la posición dentro de cierto intervalo. El error en la detección de la posición se determina mediante un circuito especializado. Cuando la luz incide sobre la superficie sensitiva del detector, las señales de posición pueden ser obtenidas mediante el circuito de determinación de posición. Si las señales de posición son graficadas a lo largo del eje de las ordenadas y las posiciones sobre la superficie sensitiva a lo largo del eje de las abscisas, se obtiene una gráfica como la mostrada en la figura 3. En ésta se observa que el punto del centro eléctrico está en la posición donde la señal es cero. La línea recta que conecta el punto del centro eléctrico y la posición de la señal, tiene una longitud en el primer cuadrante, que es proporcional a 1/3 de la magnitud total de la superficie sensitiva a partir del centro eléctrico y se toma como línea de referencia. El error en la detección de la posición, es la diferencia entre las señales de posición actuales desde esta línea de referencia. El error en la detección de la posición en un punto X sobre la superficie sensitiva se representa en la figura por la letra B.

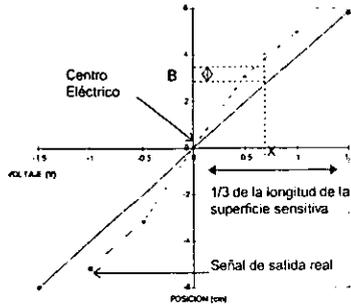


Figura 3. Gráfica de señales de posición contra posiciones sobre la superficie sensitiva.

Resolución de la posición.- Es el mínimo desplazamiento del haz de luz que puede ser detectado, es decir, el límite de detección expresado por la distancia sobre la superficie sensitiva. Generalmente, este valor numérico es proporcional al área sensitiva de detector y el ruido del sistema de medida, e inversamente proporcional a la fotocorriente (energía incidente) del detector. En el DOPEL de 10 x 10 mm la resolución de posición es de 15% = 100 ± 0.04 nA (c.f. Apéndice B).

Área sensitiva efectiva.- El área sensitiva efectiva (ver figura 4) es el tamaño de la superficie máxima capaz de detectar la posición en el detector. En un detector de colchón (véase más adelante), el área sensitiva efectiva está dada por un cuadrado inscrito entre los electrodos.

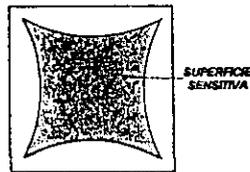


Figura 4. Ejemplo del área sensitiva efectiva de un fotodetector.

Fotoconductores.- Si incide radiación sobre un semiconductor, su conductividad se incrementa. Este efecto fotoconductor se explica de la siguiente forma; la energía radiante adicionada al semiconductor ioniza las uniones covalentes; es decir, estas uniones son rotas y se genera un agujero-electrón en exceso. Este

incremento en la corriente disminuye la resistencia del material. Este dispositivo es llamado fotorresistencia o fotoconductor. Hay tres tipos fundamentales de aplicaciones para las celdas fotoconductoras:

1. Son utilizadas para medir una cantidad fija de iluminación.
2. Para modular una intensidad luminosa.
3. Como control para determinar posiciones de rayos.

Los materiales fotoconductores más utilizados por su respuesta son las celdas de Silicio, Germanio y Cadmio. El área sensitiva de estos dispositivos consiste en una capa químicamente depositada de CdS, la cual puede contener pequeñas impurezas de Plata, Antimonio o Indio. En la oscuridad absoluta, la resistencia puede ser del orden de $2 M\Omega$ y cuando es estimulada con luz de alta intensidad, la resistencia puede ser menor a 10Ω . La principal ventaja de los fotoconductores de CdS es su gran capacidad disipadora, su excelente sensibilidad en el espectro visible y su baja resistencia cuando son estimulados con luz. Estos fotoconductores están diseñados para disipar en forma segura 300 mW y pueden ser hechos para manejar en forma segura potencias de varios watts. Así, los fotoconductores de CdS pueden operar casi sin ayuda de circuitos amplificadores intermedios.

1.2. Detectores ópticos de posición de efecto lateral (DOPEL)

El DOPEL comercial, es un sensor optoelectrónico de silicón o de germanio que provee datos continuos de posición de un punto de luz que se desplaza a través de su superficie. Comparado con el elemento detector discreto, tal como el CCD, las características de alta resolución en la posición del DOPEL, producen una alta velocidad en la respuesta.

1.2.1. Operación.

Conforme la cantidad de luz decrece gradualmente, eventualmente alcanza el punto donde se observan partículas individuales (fotones). Los fotones chocan con la superficie del fotodetector, la carga eléctrica generada en el fotodetector es dividida sobre la cubierta resistiva del fotodetector de acuerdo a la posición de entrada y es convertida en cuatro señales de pulso. Las señales de salida alimentan, a través de un preamplificador, a un analizador de posición. Aquí las señales individuales de la posición son detectadas mediante el centroide ("centro de gravedad aritmético"). Finalmente estas señales pasan a un convertidor analógico-digital para así obtener el valor de la posición. (c.f. Figura 5)

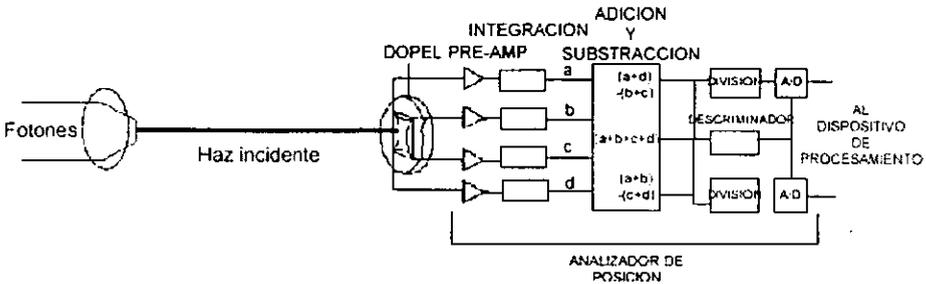


Figura 5. Principios de operación del DOPEL.

Cuando un haz de luz llega a la superficie del DOPEL, se genera una carga proporcional a la energía luminosa en la posición incidente. Esta carga eléctrica es llevada a través de la capa resistiva P (c.f. Figura 6) y colectada por los

electrodos. Dado que la resistividad de la capa P es uniforme, la fotocorriente colectada por un electrodo es inversamente proporcional a la distancia entre la posición de incidencia y el electrodo.

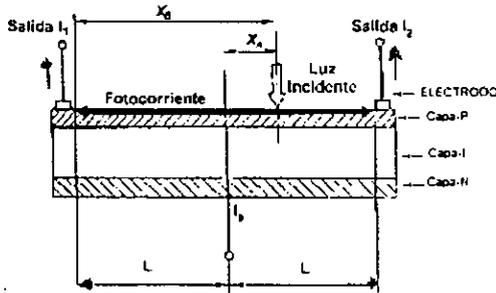


Figura 6. Vista transversal del DOPEL, indicando las fotocorrientes generadas, así como las dimensiones.

De la figura 6, se deducen las ecuaciones (1) y (2), para las fotocorrientes I_1 e I_2 colectadas por los electrodos, donde $2L$ es la distancia entre los electrodos e I_0 es la fotocorriente total:

$$I_1 = I_0 \frac{L - x_A}{2L}, \quad I_2 = I_0 \frac{L + x_A}{2L} \quad (1)$$

Restando las ecuaciones anteriores, se tiene:

$$I_2 - I_1 = \frac{I_0 x_A}{L}$$

y sumándolas

$$I_2 + I_1 = I_0$$

de donde

$$\frac{I_2 - I_1}{I_1 + I_2} = \frac{x_A}{L}, \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{L - x_A}{L + x_A} \quad (2)$$

1.2.2. Estructura del detector de posición de efecto lateral.

En la Figura 7, se muestra un corte transversal de la estructura básica de un detector de posición de efecto lateral, el cual consta de tres capas: una capa P, una I intermedia y una capa N, todo esto sobre una placa plana de silicón. La luz incidente que cae sobre la superficie del DOPEL es convertida en una corriente eléctrica y detectada por dos electrodos colocados sobre la capa P como una fotocorriente, según se explicó en 1.1.3.

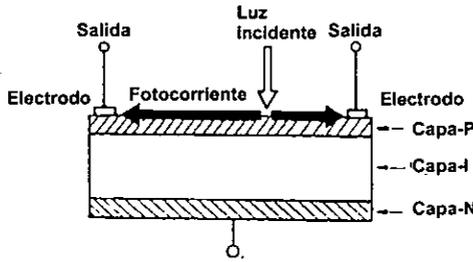


Figura 7. Vista transversal del DOPEL. El haz de luz tiene un diámetro aproximado de 2 mm.

1.2.3. Ecuaciones de conversión.

La posición del punto generado por el haz de luz incidente puede generalizarse a dos dimensiones a partir de las ecuaciones (1) y (2), donde I_{1X} , I_{2X} , I_{1Y} , I_{2Y} , representan las señales de salida o fotocorriente de cada electrodo y (X, Y) son las coordenadas rectangulares del punto generado por el haz. Así, se tiene

DOPEL unidimensional

$$\frac{I_{2X} - I_{1X}}{I_{1X} + I_{2X}} = \frac{X}{L} \quad (3)$$

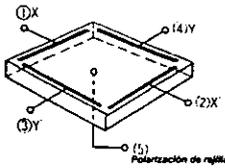
DOPEL bidimensional (tipo cuadrado)

$$\frac{I_{2X} - I_{1X}}{I_{1X} + I_{2X}} = \frac{X}{L}, \quad \frac{I_{2Y} - I_{1Y}}{I_{1Y} + I_{2Y}} = \frac{Y}{L} \quad (4)$$

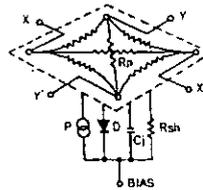
DOPEL bidimensional (tipo colchón de pin)

$$\frac{(I_{2X} + I_{1Y}) - (I_{1X} + I_{2Y})}{I_{1X} + I_{2X} + I_{1Y} + I_{2Y}} = \frac{X}{L}, \quad \frac{(I_{2X} + I_{2Y}) - (I_{1X} - I_{1Y})}{I_{1X} + I_{2X} + I_{1Y} + I_{2Y}} = \frac{Y}{L} \quad (5)$$

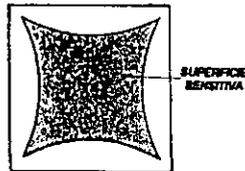
Este último tipo, cuenta con una versión mejorada llamada tipo tetralateral también conocida como colchón de pin (figura 8), la cual cuenta con electrodos y superficie fotosensitiva mejorados; respuesta más rápida y fácil aplicación del voltaje de polarización. Adicionalmente la distorsión en la circunferencia se reduce substancialmente.



(A)



(B)



(C)

Figura 8. A) Estructura del fotodetector tipo tetralateral. B) Circuito equivalente. En la figura se indican: P.- Corriente del Generador, D.- Diodo ideal, Cj.- Unión de capacitor, Rsh.- Resistencia de corte, Rp.- Resistencia de posicionamiento, (XX', YY') ejes de coordenadas. C) Superficie sensitiva.

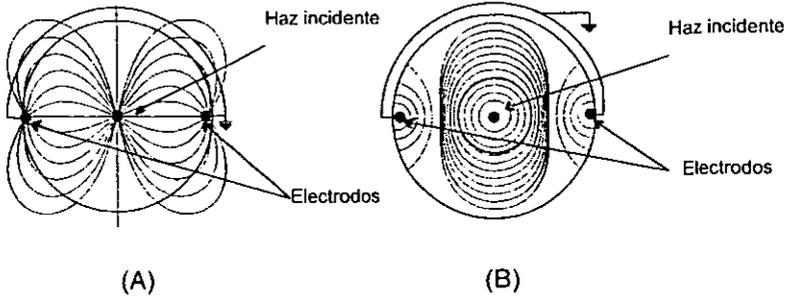


Figura 9: (A) La fotocorriente regresa hacia los electrodos, a tierra, por las líneas de campo eléctrico. (B) La circunferencia negra en el centro representa el área máxima donde la respuesta del detector es lineal porque las líneas del campo eléctrico son radiales y fuera de esta región no lo son.

1.3. Mepsicrón.

El Mepsicrón (c.f. Figura 10) es un detector óptico capaz de captar la información incidente a manera de eventos individuales, es decir, fotón por fotón.

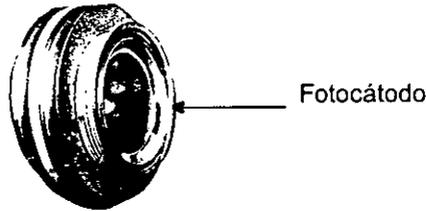


Figura 10: Detector Mepsicrón. Se muestra la parte frontal del fotocátodo.

Está constituido (c.f. Figura 10) dentro de una estructura cilíndrica que combina materiales como cerámica-metal-vidrio que garantizan hermeticidad y soporte. Este detector, posee tres partes fundamentales:

1. El *fotocátodo multialcalino*, el cual se encuentra suspendido sobre una rejilla de cuarzo. Su objetivo es el de transformar la radiación electromagnética que incide sobre la superficie en fotoelectrones.
2. Doble *apilamiento de placas microcanales*, las cuales forman un amplificador de muy alta ganancia, del orden de 1×10^8 electrones secundarios por fotoelectrón incidente^[2] y de muy bajo ruido. Los potenciales eléctricos que

regulan el funcionamiento de estos elementos, así como el espacio entre ellos, desempeñan un papel esencial en el rendimiento del sistema.

3. *Ánodo resistivo* de forma cuadrangular, éste es el elemento receptor de la carga de electrones generada por las placas microcanales al ser acelerada por un campo eléctrico.

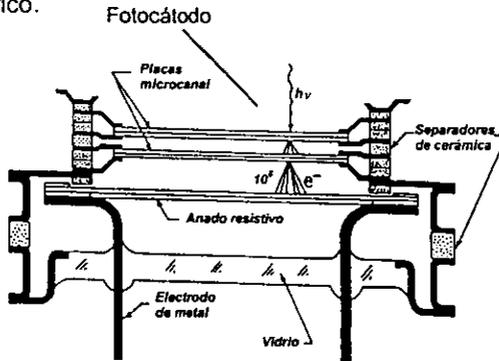


Figura 11: Detector Mepsicrón. El diagrama muestra sus partes fundamentales: Fotocátodo, placas microcanales y ánodo resistivo

El cambio en el potencial eléctrico en el inter espacio de los apilamientos, repercute en la forma de la distribución de altura de pulsos (c.f. Figura 12). Durante la elección de los umbrales para discriminación de los menos relevantes; se obtiene una distribución cuasi-Gaussina, la cual representa una eficiencia del 85%^[2].

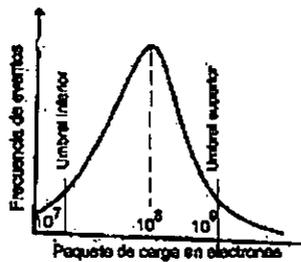


Figura12: Distribución de altura de pulsos del ánodo. Los potenciales de las placas regulan la función de probabilidad para optimizar la eficiencia en el procesamiento de la posición.

El ánodo resistivo y los cuatro preamplificadores conectados en sus esquinas, forman un codificador espacial de alta resolución para definir la posición del centroide del paquete de carga colectado.

Posteriormente un analizador de posición de eventos (APE), formado por convertidores analógico-digitales (AD) y circuitos aritméticos digitales de alta velocidad, procesan la información transmitida por los preamplificadores hasta determinar las coordenadas rectangulares del punto de incidencia del fotón sobre el fotocátodo. La resolución lograda en estos eventos es de 10 bits ($1:1 \times 10^3$) en cada eje^[2]. Este proceso tiene una duración de 3 μ s, debido a esto, la tasa máxima de conteo queda reducida a 1×10^5 eventos por segundo^[4].

Una ventaja de este detector respecto a otros, del mismo tipo, se encuentra en el ruido total del sistema que, en el caso del Mepsicrón, depende exclusivamente del ruido cuántico del disparo generado en el fotocátodo, multiplicado por la magnitud de su eficiencia cuántica^[4].

El ruido producido tanto en la resistencia del ánodo como en los preamplificadores, afecta únicamente en la indeterminación de la posición del fotón incidente, sin modificar la señal misma. Estas fuentes de ruido, definen una resolución espacial límite de 40μ (ancho a media altura).

A una temperatura de operación de -30° C, el conteo oscuro del fotocátodo es de 200 cuentas/s en toda el área sensible de 25 mm de diámetro. Debido a que esta superficie está dividida en 1024×1024 pixeles, la corriente oscura equivale a un conteo por pixel cada dos horas. Este resultado indica que el intervalo dinámico del sistema esté definido externamente, i.e. por el tamaño de cada localidad de la memoria de integración, que actualmente es de 6.5×10^4 equivalente a 16 bits.

El detector puede ser representado por un arreglo cuadrado conteniendo un total de 1×10^6 fotomultiplicadores independientes de $625 \mu\text{m}^2$ cada uno. Debido a un fenómeno de saturación local en las placas microcanales, el conteo máximo de cada fotomultiplicador corresponde a 500 cuentas/segundo.

La imagen se almacena en una memoria, de tal manera que cada elemento de resolución espacial del foto-sensor tenga asociada una localidad. La memoria es dinámica, de alta velocidad y multicanalizada para poder visualizarla permanentemente durante su formación, tanto en el periodo de exposición como en el de transferencia de datos hacia alguna computadora. Debido a que todo el acceso y actualización de la información en la memoria se realiza durante los periodos de retroceso de cuadro del monitor, las características de despliegue de la imagen permanecen inalteradas y de alta calidad.

La figura 13 muestra el sistema de detección para la adquisición y procesamiento de imágenes. Para su operación, el cabezal detector se encuentra alojado en una celda de enfriamiento que proporciona un acoplamiento mecánico, entre éste y el instrumento de análisis el cual puede ser un espectrómetro, interferómetro, etc. Se requiere para su operación, de una fuente de alimentación de 4.7×10^3 volts. El enfoque preliminar, tanto óptico como electrónico, se realiza por medio de una pantalla analógica de larga persistencia conectada al APE, mientras el enfoque fino se efectúa remotamente, aproximadamente 100m, desde el centro de cómputo local en donde se sitúa la memoria de integración y el monitor principal.

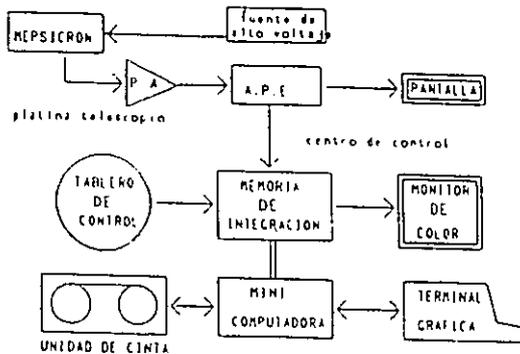


Figura 13: Sistema de detección para la adquisición y procesamiento de imágenes.

El sistema puede operar de dos maneras haciendo uso de la unidad de cinta magnética:

1. Las coordenadas del evento se almacenan, fotón por fotón, durante el periodo de exposición. De este modo, a cada uno se le adhiere el tiempo absoluto de incidencia con una resolución temporal de 100 ns.
2. Se almacena la imagen integrada o procesada interactivamente en memoria a través de la computadora.

El Mepsicrón ha tenido exitosas aportaciones en la observación de objetos astronómicos. Su aplicación se extiende a campos como la fotometría, espectroscopía, interferometría y polarimetría.

Desprovisto de su fotocátodo, el Mepsicrón es sensible en la detección directa de imágenes formadas por partículas cargadas, tales como iones o electrones, de forma semejante a lo que sucede en el plano focal de un microscopio electrónico de transmisión. En este caso sus características de resolución espacial e intervalo dinámico lo prueban como un detector idóneo.

Actualmente se desarrollan experimentos en el área de detección de imágenes con rayos X de diversas energías. Para esto, es necesario dotar al tubo con una ventana transparente de berilio, especial para este tipo de radiación y permitir su observación.

En la actualidad el Mepsicrón, cuenta con una resolución de 2000x2000 píxeles y un incremento en la tasa de conteo.

En los capítulos siguientes, se efectúa un estudio sistemático de las respuestas que caracterizan a los detectores ópticos de posición, mediante modelos experimentales, con la finalidad de desarrollar un nuevo modelo óptimo, de forma que se disminuyan los efectos no-lineales en la posición del haz incidente.

Capítulo 2. EQUIPOTENCIALES EN SUPERFICIES.

Uno de los elementos fundamentales para determinar la eficiencia del DOPEL, es la forma en como genera líneas equipotenciales.

Este segundo capítulo se divide en dos partes. En la primera se presentan las definiciones de campo eléctrico, líneas de fuerza, potencial eléctrico y líneas equipotenciales. En la segunda, se indican las condiciones a la frontera sobre los vectores del campo.

2.1. Definiciones preliminares.

2.1.1. Campo eléctrico.

El campo eléctrico se define como el límite de la razón de la fuerza sobre una carga colocada en el punto fijo con respecto a una carga de prueba, conforme la medida de la magnitud de la carga de prueba tiende a cero. Es decir, en notación vectorial se tiene

$$\vec{E} = \lim_{q \rightarrow 0} \frac{\vec{F}_q}{q} \quad (6)$$

El proceso de límite está incluido en la definición de \vec{E} para asegurar que la carga de prueba no afecte a la distribución de carga que produce \vec{E} . Si por ejemplo se distribuye carga positiva sobre la superficie de un conductor, entonces al acercar una carga de prueba a la vecindad de conductor, la carga sobre el conductor se redistribuirá. Si el campo eléctrico se hubiera calculado utilizando la razón de fuerza a carga para una carga de prueba finita, el campo obtenido sería el debido a la carga redistribuida y no él debido a la distribución original de carga. En el caso especial en que una de las cargas de la distribución de carga pueda ser usada como carga de prueba, no es necesario tomar el límite. En este caso, el campo eléctrico en la posición de la carga de prueba será el producido por todo el resto de la distribución de carga; no habrá por supuesto, redistribución de carga, ya que la distribución apropiada de carga se obtiene bajo la influencia de toda la

distribución de carga, incluida la carga que se está empleando como carga de prueba. En algunos otros casos, la distribución de carga está especificada, así que la fuerza es proporcional a la magnitud de la carga de prueba y por lo tanto es innecesario el límite.

La ecuación (6), proporciona medios para obtener una expresión del campo eléctrico debido a una distribución dada de cargas. Sea la distribución de carga tal que consista de N cargas puntuales q_1, q_2, \dots, q_n , localizadas en puntos $\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_n$, respectivamente y una distribución volumétrica de carga especificada por la densidad de carga $\rho(\vec{r}')$ en el volumen V y una distribución superficial caracterizada por la densidad superficial de carga $\sigma(\vec{r}')$ sobre la superficie S. Si una carga de prueba q se encuentra el punto \vec{r} , experimenta una fuerza \vec{F} dada por

$$\vec{F} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n q_i \frac{\vec{r}-\vec{r}_i}{|\vec{r}-\vec{r}_i|^3} + \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \int_V \frac{\vec{r}-\vec{r}'}{|\vec{r}-\vec{r}'|^3} \rho(\vec{r}') dv' + \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \int_S \frac{\vec{r}-\vec{r}'}{|\vec{r}-\vec{r}'|^3} \sigma(\vec{r}') ds' \quad (7)$$

debida a la distribución de carga dada. El campo eléctrico en \vec{r} es el límite de la razón de esta fuerza y la carga de prueba q. Como la relación es independiente de q, el campo eléctrico en \vec{r} es

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n q_i \frac{\vec{r}-\vec{r}_i}{|\vec{r}-\vec{r}_i|^3} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_V \frac{\vec{r}-\vec{r}'}{|\vec{r}-\vec{r}'|^3} \rho(\vec{r}') dv' + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_S \frac{\vec{r}-\vec{r}'}{|\vec{r}-\vec{r}'|^3} \sigma(\vec{r}') ds' \quad (8)$$

El campo eléctrico puede calcularse en cada punto del espacio en la vecindad de un sistema de cargas o de una distribución de carga. De este modo, $\vec{E} = \vec{E}(\vec{r})$ es una función vectorial puntual, o un campo vectorial.

2.1.2. Líneas de fuerza y potencial eléctrico.

Como una ayuda para visualizar la estructura del campo eléctrico asociado con una distribución de cargas particular, Michael Faraday introdujo el concepto de líneas de fuerza. Una *línea de fuerza* es una línea imaginaria dibujada de tal manera que su dirección en cualquier punto es la dirección del campo eléctrico en

dicho punto. La relación entre las líneas de fuerza y la magnitud del campo eléctrico, se pueden expresar de la siguiente forma:

1. La tangente a la línea de fuerza en cualquier punto da la dirección de \vec{E} en ese punto.
2. Las líneas de fuerza se dibujan de forma tal que el número de líneas por unidad de área de sección transversal es proporcional a la magnitud de \vec{E} . Donde las líneas están muy unidas entonces \vec{E} es grande y donde se encuentran apartadas \vec{E} es pequeño.

Considérese, por ejemplo, la estructura del campo eléctrico asociado con una sola carga puntual positiva, q_1 . Las líneas de fuerza son radiales y se dirigen hacia afuera de q_1 (c.f. figura 13) y se asume que la hoja es infinitamente larga que para una superficie finita es equivalente a considerar solamente aquellos puntos cuyas distancias desde la hoja son pequeñas comparada a la distancia al extremo más cercano de la hoja. Una carga de prueba positiva, colocada enfrente de esta carga, se movería sobre la hoja a lo largo de una línea perpendicular. Así la magnitud del campo eléctrico cerca de la hoja formaría ángulos rectos.

El campo eléctrico no es constante y decrece con la distancia, esto es evidente con las líneas de fuerza, las cuales se separan uniformemente conforme la distancia se incrementa, esto quiere decir que el campo eléctrico tiene la misma magnitud en todos los puntos del plano de la hoja. De modo semejante las líneas de fuerza asociadas a una carga puntual negativa aislada son también radiales, pero esta vez el sentido es hacia dentro, es decir, hacia la carga negativa.

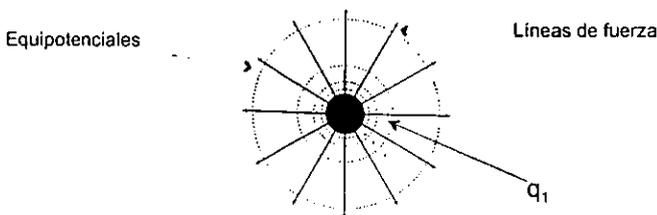


Figura 13: Líneas de fuerza y equipotenciales asociadas a una carga puntual positiva aislada.

Por simetría \vec{E} es el mismo para todos los puntos que se encuentran a la misma distancia del centro de carga. Estos dos ejemplos son extremadamente sencillos; sin embargo, ilustran una propiedad importante de las líneas de campo: las líneas de fuerza terminan en las fuentes del campo eléctrico, es decir, en las cargas que producen el campo eléctrico.

La figura 14, muestra las líneas de fuerza para dos cargas iguales (fig. 14.a) y para dos cargas de signos opuestos (fig. 14.b). En estas imágenes se observa como el campo eléctrico varía en forma continua. Este tipo de continuidad es del tipo de continuidad de las líneas de fuerza.

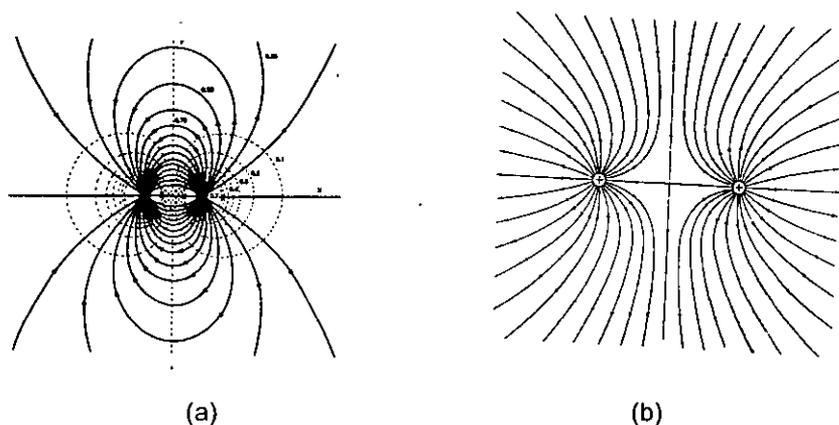


Figura 14: Líneas de fuerza (continuas) y equipotenciales (líneas punteadas), (a) Dos cargas puntuales de signos contrarios. (b) Dos cargas de igual signo.

Debido a que el trabajo es independiente de la trayectoria, el trabajo efectuado contra un campo eléctrico dentro de una trayectoria cerrada es cero. Este hecho está basado en la ley de la conservación de la energía bajo la suposición de que el movimiento de las cargas, en si mismas, no efectúa trabajo sobre el resto del universo, válido solamente si el movimiento de las cargas es cuasiestático. Esto significa que el campo eléctrico, desde el punto de vista matemático, cumple con la condición que el rotacional del vector \vec{E} es nulo y por lo tanto el vector \vec{E} puede expresarse como gradiente de un escalar. Para verificarlo, se observa que al tomar el rotacional de la ecuación (8), implica la derivación con respecto a r . Esta variable aparece en la ecuación sólo en

funciones de la forma $(\vec{r} - \vec{r}')/|\vec{r} - \vec{r}'|^3$ y por tanto será suficiente demostrar que las funciones de esta forma tienen un rotacional nulo. Aplicando la ecuación para el rotacional del producto, se tiene

$$\nabla \times \frac{\vec{r} - \vec{r}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} = \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} \nabla \times (\vec{r} - \vec{r}') + \left[\nabla \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} \right] \times [\vec{r} - \vec{r}'] \quad (9)$$

pero, por ser nablita un operador lineal, se tiene que

$$\nabla \times (\vec{r} - \vec{r}') = \nabla \times \vec{r} - \nabla \times \vec{r}' = 0$$

y como $1/|\vec{r} - \vec{r}'|^3$ es una función de r , se tiene que

$$\nabla \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} = -3 \frac{\vec{r} - \vec{r}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|^5}$$

Estos resultados, junto con la observación de que el producto vectorial de un vector con un vector paralelo es cero, son suficientes para demostrar que

$$\nabla \times \frac{\vec{r} - \vec{r}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} = 0 \quad (10)$$

Como cada contribución de la ecuación (8) al campo eléctrico es de esta forma, se demuestra con esto que el rotacional del campo eléctrico es cero. La ecuación (9) indica la existencia de una función escalar cuyo gradiente es el campo eléctrico. Entonces debe existir una función que satisfaga que

$$E(\vec{r}) = -\nabla\phi(\vec{r}) \quad (11)$$

La función ϕ es el potencial electrostático. Así, el potencial electrostático de la ecuación (7), el cual se obtiene por derivación directa, es:

$$\phi(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r-r_i} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_V \frac{\rho(r')}{r-r'} dV' + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_S \frac{\sigma(r')}{r-r'} dS' \quad (12)$$

solamente se debe aclarar que ϕ debe satisfacer la ecuación (10), pero esto se verifica directamente y es factible obtenerlo directamente tan pronto como se establezca su existencia. Puesto que se sabe que ϕ existe, se puede escribir

$$\int_{ref}^r E(\vec{r}') \cdot d\vec{r} = -\int_{ref}^r \nabla \varphi \cdot d\vec{r} \quad (13)$$

donde *ref.* indica un punto de referencia en el que φ es cero. De la definición de gradiente

$$\nabla \varphi \cdot d\vec{r} = d\varphi$$

al sustituir la ec. (12) en la ec. (11), esta se convierte en la integral de una diferencial perfecta, que se resuelve fácilmente. El resultado es

$$-\int_{ref}^r \nabla \varphi \cdot d\vec{r}' = -\varphi(\vec{r}) = \int_{ref}^r E(\vec{r}') \cdot d\vec{r}' \quad (14)$$

que es realmente la inversa de la ecuación (11).

La utilidad del potencial electrostático puede notarse al comparar las ecuaciones (7) y (11). La primera es una ecuación vectorial y por ello los cálculos requeridos para obtener el campo eléctrico son más complejos que en el caso de la ecuación (11) la cual es una ecuación escalar. Esta simplificación es a veces suficiente para establecer la diferencia entre tener que efectuar las integrales.

De lo anteriormente expuesto se pueden concluir, algunas de las leyes básicas de la electrostática:

1. Las líneas de un campo eléctrico son normales a las superficies equipotenciales.
2. La integral de línea de un campo electrostático alrededor de una trayectoria cerrada es cero.
3. El campo eléctrico es igual al gradiente negativo de un potencial escalar.
4. El campo electrostático dentro de un conductor es cero.
5. La superficie de un conductor es equipotencial.

Capítulo 3. MODELOS GEOMETRICOS Y EXPERIMENTAL DEL DETECTOR OPTICO DE POSICION DE EFECTO LATERAL

Uno de los elementos fundamentales para determinar la eficiencia del DOPEL, es la forma en como genera líneas equipotenciales, así como su forma de operación. A efecto de estudiar estos temas; el presente capítulo se divide en cinco partes. La primera muestra los elementos precedentes a la investigación, respecto a las características operativas del DOPEL. La segunda presenta una clasificación de las diversas geometrías del detector. La tercera sección, hace referencia al comportamiento de la disposición geométrica de los electrodos y fronteras utilizados en el detector comercial. La penúltima parte de este capítulo, es una descripción del dispositivo experimental utilizado para caracterizar la respuesta del DOPEL. Finalmente, en la quinta sección, se muestra un análisis de los resultados obtenidos.

3.1. Antecedentes

Para analizar sus propiedades de respuesta respecto a la precisión de las mediciones de posición a una señal de luz láser, se utilizó un detector SC50 marca UDT (United Detector Technology). Este detector es un fotodiodo de efecto lateral, de forma circular con un diámetro de 45 mm del área activa, acoplado a un acondicionador analógico marca UDT modelo 301-DIV en cada eje del detector. El detector cuenta además; con dos amplificadores que proporcionan la posición de dos ejes en forma continua; esta unidad censa el centroide de un haz láser y provee una salida analógica.

En la configuración para efecto de pruebas de laboratorio, se utilizó un láser de He-Ne de 1.5 mW marca Spectra-Physics modelo 117A estabilizado en intensidad y dos posicionadores marca Newport de la serie 850, controlados por un sistema PMC300. Para medir la señal de salida de los acondicionadores, se utilizó un osciloscopio marca Tektronix modelo TDS744A. El arreglo experimental se detalla en la figura 15.

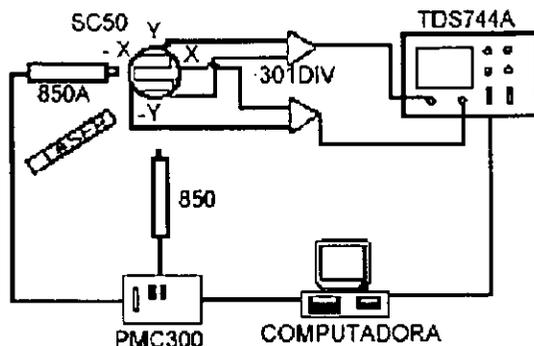


Figura 15: Arreglo experimental usado para caracterizar al detector SC50.

Se midió el voltaje a la salida de los amplificadores 301DIV a intervalos regulares de 2 mm en toda la superficie.

Según especificaciones del fabricante^[6], la señal es proporcional a la posición del haz del detector en ambos ejes. La respuesta eléctrica a la posición del detector SC50, se muestra en la fig. 16, en esta se observa que la salida V_x y V_y del 301DIV *no son proporcionales a la posición del haz en el detector*, pues los datos deberían aparecer en una malla rectangular con espaciado uniforme. Si se grafica el comportamiento de un solo eje, o cualquier eje paralelo al tomado como X, se obtiene experimentalmente que la posición del haz incidente en la superficie sensible está dada como la tangente del voltaje de salida V_x de los amplificadores 301 DIV (c.f. sec. 3.3).

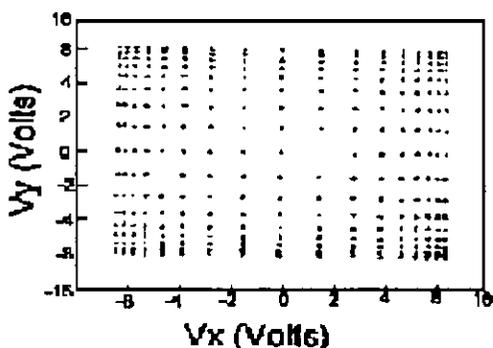


Figura 16. Respuesta del detector circular de posición de efecto lateral. Se muestran los voltajes en ambos ejes del detector.

Si comparamos este resultado con las equipotenciales del modelo en gel, con la misma geometría del detector, como se muestra en la figura 16, se observa que el comportamiento de la distancia entre las líneas equipotenciales sobre la línea de campo, es el mismo que sigue la respuesta del detector; esto es, la respuesta no es lineal en toda la superficie, sin embargo la no-linealidad en el centro es pequeña. La región donde la no-linealidad es menor al 1% es aproximadamente el 10 % de la superficie sensible.

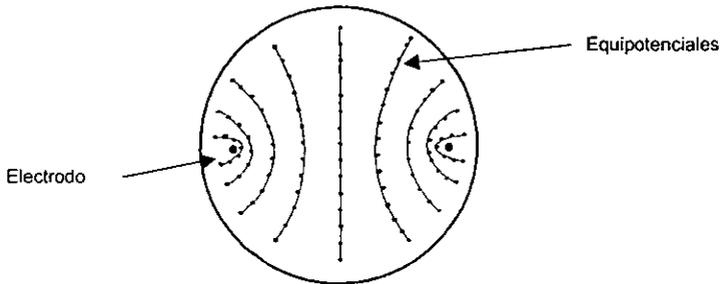


Figura17: Equipotenciales de dos electrodos puntuales con frontera dieléctrica circular.

En el caso del detector de adquisición de imágenes por conteo de fotones, existe el mismo problema de no-linealidad^[7], para aumentar la superficie donde la no-linealidad es menor al 15%, se sugieren geometrías de frontera limitadas por arcos de círculo, mostradas en la figura 17, donde se mejora la no-linealidad en el 14% de la superficie total. Esta misma solución se puede aplicar a los DOPEL; sin embargo ocasiona un incremento excesivo en el diámetro. El análisis experimental de la superficie fotosensible se realiza por medio de un dispositivo de laboratorio (c.f. 3.4) que permite generar modelos de los comportamientos de las líneas equipotenciales en los detectores, permitiendo modificando la curvatura de estas líneas por medio del cambio de la geometría en la distribución de los electrodos y en las fronteras del modelo.

3.2. Modelos geométricos.

El comportamiento de las trayectorias que siguen las corrientes generadas en el punto de incidencia del haz láser en las superficies conductoras hacia los

electrodos, depende de las diversas geometrías de estos últimos.

Existen en el mercado varios tipos de detectores utilizados para determinar la posición del centroide de un haz en el plano XY ortogonal al eje óptico, sin embargo en nuestro caso utilizaremos aquellos detectores que son utilizados para determinar la posición del centroide del haz en el plano XY ortogonal al eje óptico; conocidos como detector de cuadrante y detector óptico de posición de efecto lateral de ejes duales, mostrados en la figura 18.

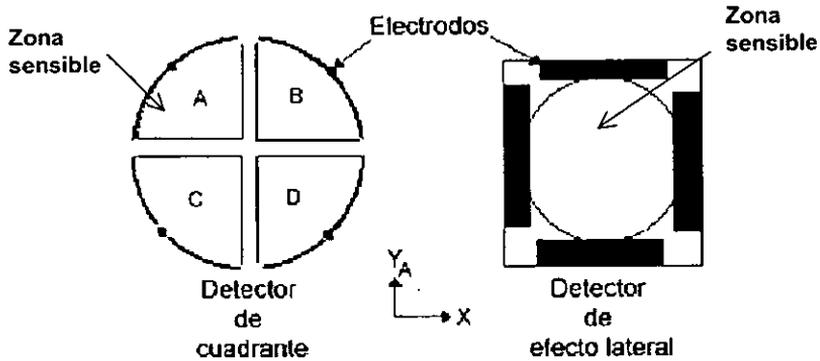


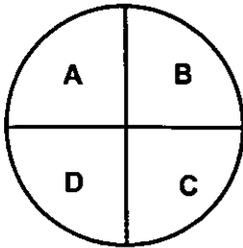
Figura 18. Configuración física de los detectores de cuadrante y efecto lateral.

Detector de cuadrante. Es un disco uniforme de silicón con dos hendiduras que pasan de un extremo a otro de la superficie del detector. Así, se tienen 4 fotodetectores iguales e independientes, sobre la superficie sensitiva. El centro del detector es la parte de mayor precisión puesto que es la intersección mecánica de las dos hendiduras y no cambia con el tiempo ni con la temperatura. Un láser centrado en el detector genera fotocorrientes para cada uno de los sectores.

Un arreglo simplificado, en forma de celda, llamado detector de cuadrante (c.f. figura 19), supera las desventajas de un arreglo multielemento, aunque solo para ciertas aplicaciones, según se explica en los siguientes párrafos. El detector de cuadrante se encapsula en un solo chip. Para una óptima resolución el tamaño del punto de luz debe ser tan pequeño como sea posible, pero sin ser menor que el espacio entre celdas. Si el haz se mueve desde el centro del detector, las corrientes provenientes de los cuatro sectores cambiarán y las magnitudes de estas corrientes en las salidas de las celdas individuales, permitirá obtener la

posición del punto luminoso con respecto al centro del detector. En la actualidad se dispone de instrumentos electrónicos los cuales, automáticamente, realizan las operaciones algebraicas necesarias y determinan directamente la posición, en ambos ejes, del haz luminoso sobre el detector. También se dispone de interfaces con computadora, lo cual permite transferir la información referente a la posición a una base de datos.

En la fig. 19, se muestra un esquema del detector de cuadrante y las ecuaciones utilizadas para determinar la posición del haz. Las letras A, B, C y D representan las corrientes generadas por su sector respectivo.



$$X = \frac{(A+D)-(B+C)}{A+B+C+D}$$

$$Y = \frac{(A+B)-(D+C)}{A+B+C+D}$$

Figura 19. Configuración de un detector de cuadrante.

La fig. 20, muestra el rango de medida de posición del detector de cuadrantes de 8 mm de apertura entre cuadrantes, como una curva centrada. Como se puede observar, si se dispone de un rayo de 2 mm de diámetro, su centro puede ser desplazado máximo 1 mm en cualquier dirección antes de que deje de detectar correctamente la posición. Así, el centro del haz debe permanecer dentro de un círculo de 2 mm de diámetro centrado en el detector. Movimientos del haz mayores a 4 mm de diámetro están restringidos⁽¹¹⁾ debido a la separación entre sectores mas que por la superposición del haz sobre todos los sectores. Consecuentemente el centro, de un haz de 6 mm de diámetro, se puede mover solamente 1 mm en cualquier dirección sin salir del espacio entre sectores perdiendo, por ende, la señal.

Las ecuaciones (3) y (4), utilizadas para obtener la posición del haz, asumen una incidencia rectangular del haz con una iluminación uniforme. Sin

embargo, la mayoría de los haces láser son circulares y tienen una distribución de intensidad Gaussiana. Como resultado, las fotocorrientes se hacen no-lineales para desplazamientos mayores al 10% del radio del rayo. Entonces, la medición de valores de la posición (coordenadas XY absolutas) se hacen inaccesibles para desplazamientos mayores que los mostrados en la curva de medición de la figura 20.

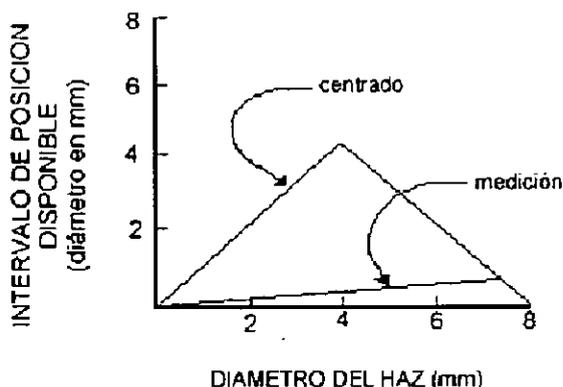


Figura 20: Rango de medida de posición del detector de cuadrantes de 8 mm de apertura entre cuadrantes. Conforme crece el diámetro del haz la determinación de la posición disponible decrece.

Detector óptico de posición de efecto lateral de ejes duales. Este detector está formado por un disco de silicón barnizado; con cuatro electrodos conectados en forma equidistante alrededor de su perímetro.

En ambos casos 4 electrodos están ligados al detector y las cuatro corrientes generadas mediante fotoabsorción, son procesadas con el algoritmo adecuado para dar la posición XY. Los electrodos están conectados de forma tal que pares opuestos generan una fotocorriente que puede ser procesada mediante un algoritmo para generar valores de desplazamiento únicos en las direcciones X y Y, según se muestra en la figura 21.

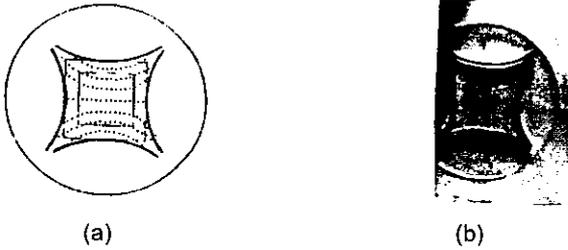


Figura 21: Geometría utilizada en detectores ópticos comerciales. (a) Modelo mapeado en acetato. (b) Fotografía del modelo experimental.

Tradicionalmente, el algoritmo se programa mediante el uso de circuitos electrónicos que generan algún porcentaje de error en la determinación de la posición. Algunas compañías^[6], utilizan algoritmos controlados por software y utilizan correcciones de calibración almacenadas en memoria a fin de linealizar la respuesta del detector y obtener una calibración precisa sobre toda la superficie detectora. Esta característica de linealización implica que a diferencia del detector de cuadrante, el detector de efecto lateral de ejes duales puede ser usado para mediciones precisas^[6] sobre toda la superficie.

La fig. 22, muestra el rango de medida de posición del detector de efecto lateral de ejes duales de 8 mm de diámetro.

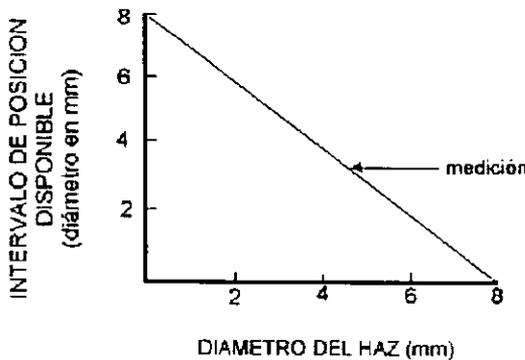


Figura 22. Rango de medida de posición del detector óptico de posición de efecto lateral de ejes duales de 8 mm de diámetro. El rayo debe permanecer completamente dentro del área de detección, rayos con un mayor diámetro tienen un rango limitado de desplazamiento.

En contraste con el detector de cuadrante, rayos muy pequeños pueden moverse sobre la superficie del detector de efecto lateral. Sin embargo debido a que el rayo debe permanecer completamente dentro del área de detección, rayos con un mayor diámetro tienen un rango limitado de desplazamiento. Ambos tipos de detectores presentan otros problemas en la detección, según se mencionan en la siguiente sección.

3.3. Comportamiento de la disposición geométrica de los electrodos y fronteras.

El primer inconveniente, lo presenta el detector de cuadrante; su problema radica en el hecho de que si un rayo superpone dos sectores, las ecuaciones de posición solamente permitirán generar un valor para una de las coordenadas; no ambas, es decir, se requiere que el rayo tenga contacto con todos los cuadrantes. Considérese, por ejemplo, un rayo que se superpone en dos sectores, A y B, de la figura 19; ninguna señal será generada por los sectores C y D, consecuentemente las coordenadas no serán generadas adecuadamente. Es claro de la figura 19, que dependiendo de la posición vertical del rayo, si solamente se iluminan dos sectores, la posición en Y será siempre igual a 1. Como resultado, solamente el valor de X tendrá sentido. En aplicaciones para determinar el centro de incidencia de un haz, esta restricción impone limitaciones sobre el desplazamiento máximo del rayo relativo al centro del detector, el cual solamente provee información de la posición para pequeños desplazamientos del rayo.

Por otro lado, en el caso del detector de efecto lateral de ejes duales, debido a que el haz debe permanecer completamente dentro del área de la superficie detectora, implica que haces de diámetro mayor deben estar limitados a ciertas regiones. Por ejemplo, el centroide de un haz de 4 mm de diámetro debe caer dentro de un círculo del mismo diámetro dentro del detector.

La determinación de los parámetros del SC50 da como resultado una función de la forma

$$X = A \tan\left(\frac{V_x}{B}\right) \quad (15)$$

donde A y B son parámetros que se obtienen al llevar a cabo una regresión lineal y todos los datos siguen el mismo comportamiento; es decir, si se grafica el comportamiento de un solo eje (cualquier eje paralelo a los tomados como X y el eje X), se observa que la posición del haz incidente en la superficie fotosensible, está dada como la tangente del voltaje de salida de los amplificadores, como se muestra en la figura 23.

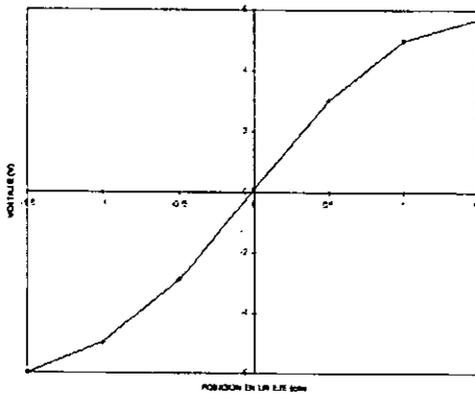


Figura 23. Comportamiento tangencial de X/V_x .

Al aplicar el modelo para obtener las posiciones a partir de los voltajes medidos se obtienen los puntos que se muestran en la figura 25. En ella se pueden apreciar como se corrige el espaciamento de la malla de datos que se tenía en la figura 17.

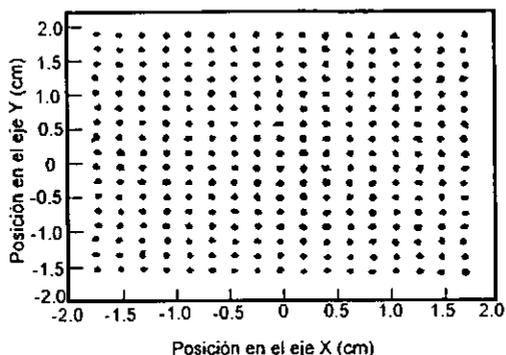


Figura 24. Coordenadas de la posición, obtenidas a través del modelo.

Con el uso de modelos que permitan visualizar las líneas equipotenciales y de campo, se puede prever según se describe en la siguiente sección, la geometría para los electrodos y frontera de la superficie conductora que proporcione una respuesta lineal en la posición en un 100% del área del detector; esto mejoraría considerablemente la región útil si los fabricantes de estos dispositivos adoptaran la nueva disposición y geometría de los elementos involucrados.

3.4. Equipo para observar equipotenciales.

La representación gráfica de las líneas de campo y equipotenciales en la superficie resistiva homogénea del modelo en gel del SC50 resulta sumamente importante, pues permite observar de una manera sencilla el comportamiento de las trayectorias que siguen las corrientes generadas en el punto de incidencia del haz láser en las superficies del detector, dando paso a la generación de modelos matemáticos adecuados de su respuesta con relación a la geometría de los electrodos. Para tal efecto se utiliza el dispositivo experimental^[8], que se muestra en la figura 25, constituido de cuatro partes:

1. *Película resistiva homogénea o (gel).*- Esta película, se genera mediante una mezcla de grenetina natural y sal común, en proporciones de peso de 4:1. De esta mezcla se disuelven 100 g en 1 litro de agua caliente. La solución así

formada; se vierte en recipientes aislantes, refractarios, de geometrías diversas o charolas metálicas bien nivelados, con un diámetro aproximado de 25 cm, procurando que el espesor de la solución no exceda los 5 mm. Esta solución al enfriarse, forma un gel resistivo.

2. *Electrodos metálicos.*- Estos elementos pueden ser tornillos; se recomienda que sean de acero inoxidable, latón o cintas con la geometría y distribución del modelo a estudiar; con una altura mayor a la película resistiva, de forma tal que sobresalgan del nivel del gel. Es necesario colocar el recipiente sobre una superficie nivelada, con el fin de obtener un espesor uniforme.

3. *Fuente de polarización.*- Está formada por un transformador de 6 VCA de salida, dos resistencias: una fija de 2.2Ω a $\frac{1}{2} W$ y una variable de 1Ω de 10 vueltas, que permiten ajustar el voltaje alterno de alimentación a 100 mVRMS máximo entre los electrodos, para disminuir los efectos electrolíticos. Puede utilizarse como fuente un generador de funciones comercial operando con señal senoidal, a una frecuencia fija entre 60 y 1000 Hz.

4. *Voltímetro digital de corriente alterna de tres o más cifras.*- Esta parte del dispositivo se utiliza para localizar las líneas equipotenciales.

El equipo puede ser complementado con un conjunto de electrodos, un marcador y cables necesarios para las interconexiones.

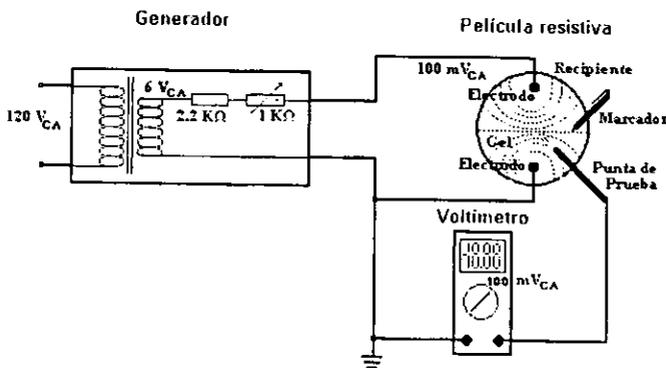


Figura 25. Diagrama esquemático del dispositivo experimental.

Las líneas equipotenciales se obtienen fijando una diferencia de potencial entre los electrodos, previamente ubicados en el gel, ajustándola a 100 mVRMS. A continuación se localizan, con la punta de prueba del voltímetro digital, los puntos de la superficie resistiva de igual potencial, colocando una marca de tinta en cada uno de estos puntos (fig. 26), trazando de manera discreta las líneas equipotenciales.

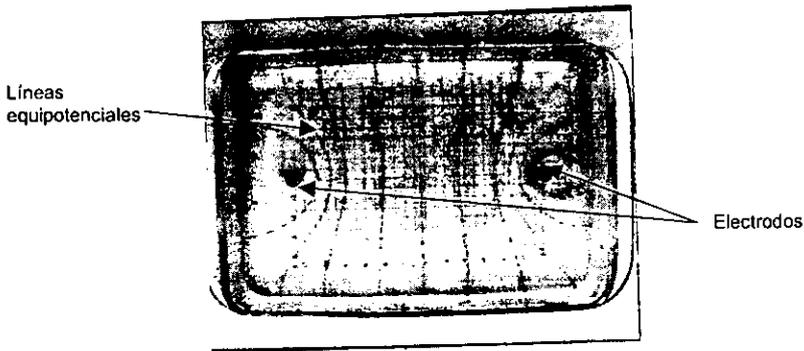


Figura 26. Mapeo de puntos equipotenciales en un recipiente rectangular con gel.

A fin de permitir un análisis de los datos experimentales, es factible obtener una impresión de los resultados, copiando los puntos obtenidos en una hoja de papel húmedo que se adhiere a la superficie del gel por 3 o 4 minutos, que al desprenderla presenta una imagen invertida de los puntos, o bien, colocando una transparencia en la parte posterior del recipiente sobre la superficie resistiva (fig. 27); este último método induce un pequeño error por paralaje, pero se obtienen imágenes adecuadas para su análisis al superponerle una matriz de coordenadas. La copia de los puntos es una imagen invertida de la superficie conductiva que contiene los puntos de las líneas equipotenciales. Si se deja deshidratar la gelatina en el recipiente, se obtiene un registro permanente, pudiéndose utilizar como un modelo para su ulterior análisis.

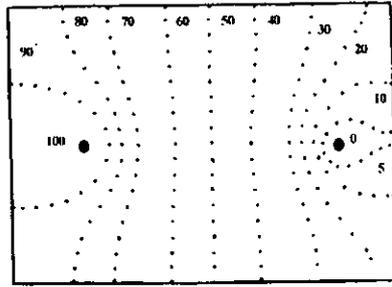


Figura 27: Mapeo de puntos equipotenciales de un recipiente rectangular sobre un papel, los valores están dados en mV.

La imagen obtenida es digitalizada mediante una cámara o un scanner, con lo cual se obtiene un archivo digital del experimento y con la ayuda de alguna herramienta de software de computadora de adquisición de imágenes, se pueden obtener las coordenadas en pixeles de los puntos mapeados, de esta forma se facilita el proceso de análisis de datos experimentales.

Al aplicar el modelo para obtener las posiciones a partir de los voltajes medidos se obtienen los puntos que se muestran en la fig. 28. En ella se puede apreciar como se corrige el espaciamiento de la malla de datos que se tenía en la fig. 16.

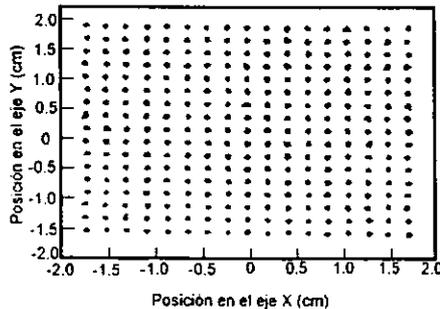


Figura 28. Coordenadas de la posición, obtenidas a través del modelo.

En la fig. 29, se muestran los valores de las desviaciones entre los valores de las posiciones obtenidas a partir del modelo y las posiciones reales. De esta figura se puede ver que las desviaciones medidas en la región central de 1.5 cm

de diámetro no son mayores a $20\ \mu\text{m}$ y crecen hacia el borde, siendo el máximo de $140\ \mu\text{m}$.

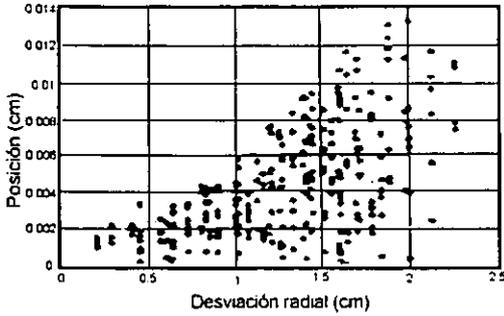


Figura 29. Desviación de los valores de las posiciones obtenidas a partir del modelo y las posiciones reales.

3.5. Resultados experimentales.

En la fig. 30, se muestran los resultados obtenidos al aplicar la técnica mencionada en 3.4, en diversas superficies a estudiar. En la fig. 30(a), se observa una curvatura convexa con respecto al centro geométrico, en (b) la curvatura se presenta cóncava y (c) es resultado de la combinación de las dos anteriores.

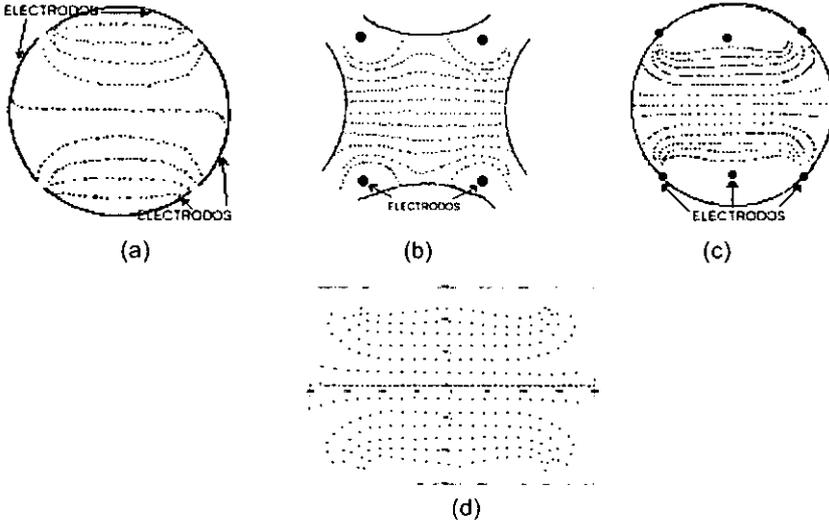


Figura 30. Líneas equipotenciales con comportamiento (a) convexo, (b) cóncavo, (c) combinado. En la figura (a), se muestran líneas equipotenciales obtenidas con fronteras circulares seccionadas. (d) Puntos de las equipotenciales digitalizados.

La figura 31 muestra las mejoras al comportamiento en la respuesta lineal, en (a) dos círculos concéntricos al modelo, en el área del círculo interior se tiene una no-linealidad menor al 1%, siendo ésta el 35.5% de área efectiva, en (b) se observan dos cuadrados, uno inscrito y otro circunscrito; en el primero la no-linealidad es menor que el 4% en un 45.2% del área efectiva y en el segundo, menor al 0.1% en el 22% del área efectiva (c.f. Apéndice A).

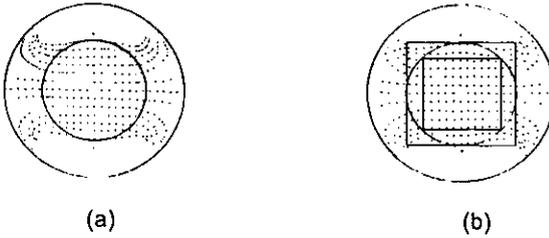
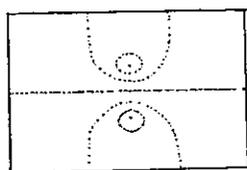


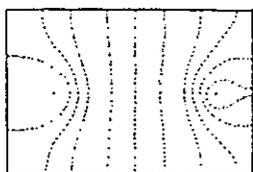
Figura 31. Región con comportamiento no-lineal, (a) menor al 1%, (b) círculo inscrito, menor al 0.1% y círculo circunscrito, menor al 4%.

Estos resultados se obtienen combinando únicamente geometrías de electrodos y fronteras, sin adicionar elementos externos activos o pasivos, por lo que su implementación en la fabricación de detectores es relativamente sencilla. Al lograrse una superficie mayor donde la no-linealidad es menor al 1%, permite aumentar el área útil en los detectores ópticos. En el Mepsicrón se aumentaría el área útil de las placas microcanales, así como la disminución del tamaño, lo que permitiría un aumento en la cantidad de píxeles de la imagen.

En la fig. 32, se muestra la gráfica obtenida con un recipiente de fronteras rectangulares de 40x30 cm, en (a) la distancia entre los electrodos puntuales es la tercera parte del ancho y en la fig. (b) aproximadamente el ancho de la superficie. Los puntos muestran las líneas equipotenciales sobre las cuales se indica el valor del potencial en mV. Se observa que las líneas equipotenciales adquieren la forma aproximada de un dipolo con fronteras finitas, puesto que al aproximarse a estas se desvían hacia afuera, siguiendo una dirección perpendicular a las fronteras.



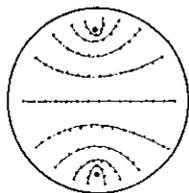
(a)



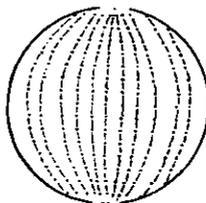
(b)

Figura 32. Equipotenciales de electrodos puntuales separados por una distancia igual a (a) la tercera parte del ancho de la frontera, (b) al ancho de la frontera. Además se muestran imágenes fotográficas del modelo experimental.

El caso de un recipiente circular, se muestra en la fig. 33. En (a) los electrodos puntuales están separados a lo largo de un diámetro y cerca de la frontera, la distribución de las líneas equipotenciales deja de parecerse a las de un dipolo debido a la influencia que las fronteras dielécticas ejercen sobre las equipotenciales; sin embargo, esta distribución sigue con mucha aproximación a la de los detectores circulares de posición, cuyos electrodos tienen la misma distribución. En la fig. 33(b), se muestra el resultado del mapeo de la configuración geométrica complementaria de la fig. 33(a), es decir, las fronteras dielécticas se cambian por dos arcos conductores separados por una distancia igual al diámetro de los electrodos de la figura anterior, se observa que las líneas equipotenciales no cruzan estas fronteras, sino que se conforman asintóticas a ellas.



(a)



(b)

Figura 33. Equipotenciales de electrodos puntuales con fronteras circulares, (a) y (b) presentan geometrías complementarias.

Se observa en la fig. 34, que si superponemos las figuras anteriores, las trayectorias de las equipotenciales de una configuración son perpendiculares a la otra en toda la superficie, esto es, las líneas equipotenciales se comportan como las líneas de campo de la configuración complementaria respectiva.

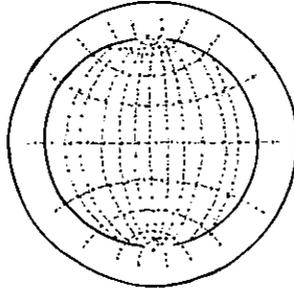


Figura 34. Superposición de las figuras 35(a) y 35(b). Se observa que las líneas equipotenciales de una son equivalentes a las líneas de campo de la otra

Adicionalmente, en la fig. 34, se muestra el mapeo de una configuración circular seccionada, que muestra otra conformación de las líneas, además de las asimetrías debido a desviaciones en geometría y posición de electrodos.

De acuerdo con los resultados se puede concluir que es posible modelar las líneas equipotenciales del DOPEL mediante el modelo en gel, caracterizándolas. Mediante estas representaciones de las líneas equipotenciales se tiene que el mejor modelo geométrico para reducir la no-linealidad es el de dos circuitos concéntricos, en donde dentro del área del círculo interior se tiene una no-linealidad menor al 1%, siendo esta el 35.5% de área efectiva y con la geometría de dos cuadrados, uno inscrito y otro circunscrito, en el primero la no-linealidad es menor que el 4% en un 45.2% del área efectiva y en el segundo, menor al 0.1% en el 22% del área efectiva.

En resumen, si se utiliza este dispositivo en aplicaciones donde se requiere más precisión en la posición de las líneas, es suficiente con aumentar las proporciones del modelo utilizando tanto generadores como medidores más estables y precisos, lográndose aumentar un orden de magnitud la reproducción

en la posición, esto es, lograr un error de 0.1%, además de las posibles correcciones por interpolación.

Capítulo 4. CORRECCIÓN DE LA RESPUESTA NO-LINEAL

Los problemas señalados en el capítulo 3, son factibles de ser solucionados mediante el uso de una nueva disposición de los electrodos y las fronteras utilizados para su funcionamiento. Para tal efecto es necesario establecer el modelo matemático que explique el problema y permita implementar una solución adecuada. En este sentido, este capítulo se divide en tres partes. La primera muestra una nueva disposición de los electrodos y fronteras utilizadas. La segunda presenta un modelo matemático de las equipotenciales para fronteras rectangulares del detector con dos electrodos y para la nueva disposición de fronteras y electrodos. Finalmente, en la tercera sección, se encuentra un análisis de los resultados obtenidos a partir del nuevo modelo propuesto.

4.1. Nueva disposición de electrodos y geometrías de fronteras

El análisis experimental de la superficie efectuado mediante el dispositivo indicado en el capítulo 3, permite simular modelos de los comportamientos de las líneas equipotenciales en los detectores, modificando la curvatura de estas líneas por medio del cambio en la geometría, en la distribución de los electrodos y fronteras del modelo. En la figura 36, se muestran imágenes de diversas geometrías utilizadas para modelar las líneas equipotenciales.

Los resultados de aplicar esta técnica mencionada en el capítulo anterior, en las superficies a estudiar, llevaron a la generación de una distribución optimizada de los electrodos y fronteras.

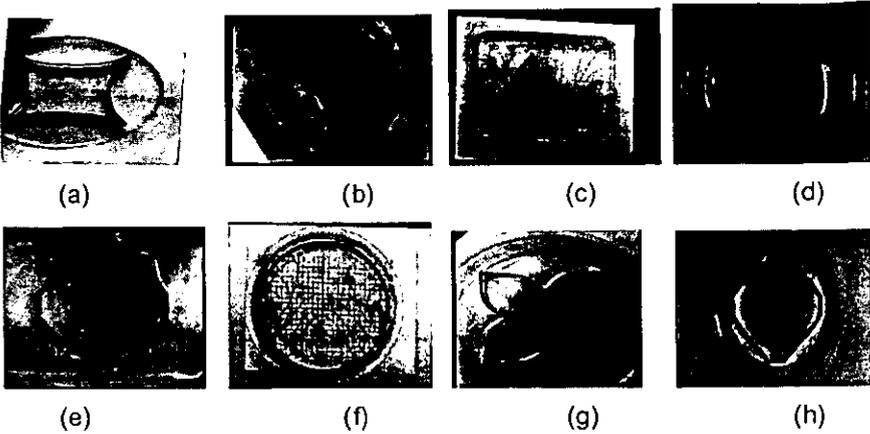


Figura 36: Diferentes modelos experimentales de disposición de electrodos y fronteras para generación de líneas equipotenciales. Las figuras (c) y (f) presentan electrodos puntuales.

Esta redistribución se basa en el hecho experimental, de que las líneas equipotenciales se distribuyen de manera uniforme si se colocan los electrodos por pares separados diametralmente en un modelo con fronteras circulares. Esta nueva disposición de los electrodos y fronteras se muestra en la figura 37. La fotocorriente viaja a través de las líneas de campo eléctrico hacia los electrodos en el modelo finito, como se muestra en la fig. 37B.

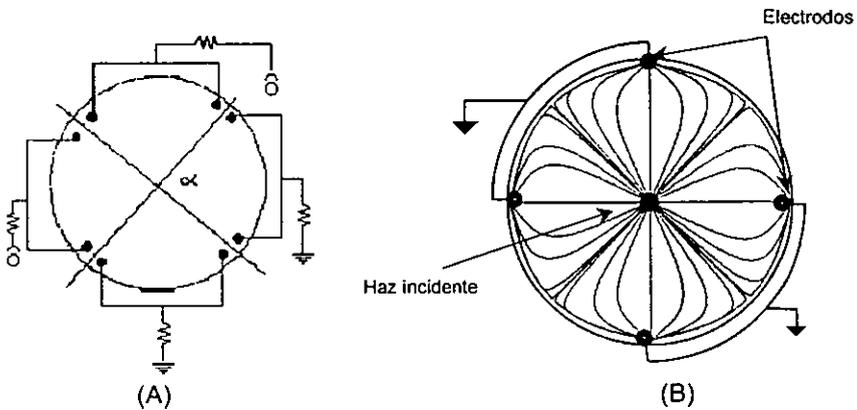


Figura 37: (A) Nueva geometría de electrodos y fronteras para un DOPEL a fin de aumentar el área de respuesta lineal. El ángulo α de separación entre cada electrodo es de 81° ; este valor se obtuvo experimentalmente. Los anillos representan generadores de corriente. (B) Líneas de campo para un haz incidente en el centro de una configuración de 2 pares de electrodos con fronteras.

La figura 38, muestra las mejoras obtenidas al comportamiento en la respuesta lineal, al hacer uso de la nueva distribución de electrodos. En (a) se presenta una gráfica de voltaje contra posición para una distribución de equipotenciales en el eje principal de la superficie resistiva; obsérvese como la curva tiene la forma de $A \tan(x)$ donde A es una constante, que se obtiene experimentalmente y x representa la posición del haz sobre el detector^[6]. En (b) se observa la linealización de la respuesta del nuevo modelo, se muestran las pendientes y ordenadas al origen de cada curva.

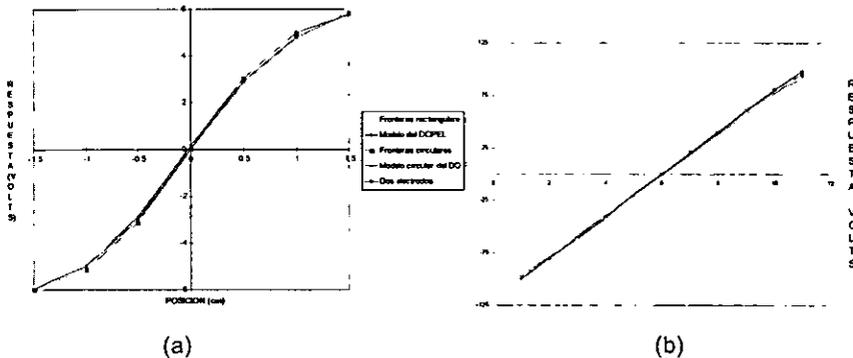


Figura 38. (a) Distribución de equipotenciales en el eje principal de la superficie resistiva.(b) Linealización de la respuesta del nuevo modelo, se muestran las pendientes y ordenadas al origen de cada curva.

Si comparamos este resultado con las equipotenciales del modelo en gel, con la geometría del detector SC50, como se muestra en la figura 38; se observa que el comportamiento de la distancia entre las líneas equipotenciales sobre la línea de campo, en el caso del DOPEL SC50 es el mismo que sigue la respuesta del detector, esto es, la respuesta no es lineal en toda la superficie, aunque la alinealidad en el centro es pequeña. En contraste, el modelo propuesto presenta un comportamiento en el cual el 100% de la superficie sensible presenta una no-linealidad menor al 1%.

4.2. Modelo matemático de equipotenciales.

La superficie donde se encuentran los electrodos y se generan las líneas equipotenciales se pueden modelar mediante el uso de una superficie coordinada

en un sistema rectangular, por lo tanto dado a fin de modelar mejor el comportamiento del sistema, se hace uso de coordenadas curvilíneas.

Dado un punto P de coordenadas (x, y) se le pueden asociar un conjunto de números (u_1, u_2) que se llaman coordenadas curvilíneas de P. Las coordenadas rectangulares del punto P pueden ser expresadas como función de las variables (u_1, u_2) en la forma

$$\begin{aligned} X &= x(u_1, u_2) \\ Y &= y(u_1, u_2) \end{aligned} \quad (16)$$

Las funciones que aparecen en la ecuación 16 se suponen uniformes y con derivadas continuas de manera que la correspondencia entre pares coordenados es biunívoca.

En general los electrodos generan líneas equipotenciales las cuales tienen un comportamiento semejante al de dos dipolos eléctricos, esto da la pauta para asumir que un modelo adecuado al problema de la simulación de equipotenciales en el DOPEL es mediante una transformación de coordenadas rectangulares a coordenadas dipolares; estas últimas se definen como

$$\begin{aligned} x &= \frac{a \operatorname{senh} v}{\cosh v - \cos u} \\ y &= \frac{a \operatorname{sen} u}{\cosh v - \cos u} \\ z &= z \end{aligned} \quad (17)$$

donde $0 \leq u < 2\pi, -\infty < v < \infty, -\infty < z < \infty$.

Un diagrama de estas coordenadas, se presenta en la figura 39.

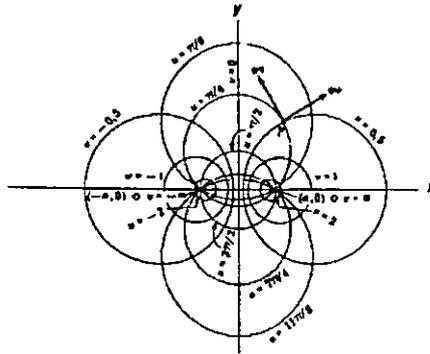


Figura 39. Coordenadas dipolares para un dipolo.

Al aplicar el modelo para simular las posiciones a partir de los voltajes medidos se obtienen los puntos que se muestran en la fig. 40, donde muestra una comparación entre los puntos obtenidos en forma experimental y el modelo obtenido mediante coordenadas bipolares para un muestreo de puntos en un molde rectangular. En esta figura, se puede apreciar como se asemejan los puntos del modelo teórico (fig. 40b) con los del modelo experimental (fig. 40a).

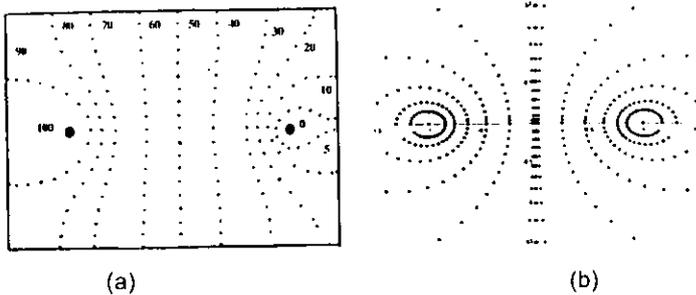


Figura 40: (a) Mapeo de puntos equipotenciales de un recipiente rectangular sobre un papel, los valores están dados en mV. (b) Modelo matemático en coordenadas dipolares de un dipolo. La distancia entre cargas es una unidad.

El modelo experimental utilizado para representar el comportamiento de las líneas equipotenciales del DOPEL SC50 (c.f. cap. 3), se muestra en la fig. 41. Este modelo, al igual que el detector SC50, consta de 4 electrodos. En la fig. 41, se pueden apreciar claramente los efectos de borde que se producen en las fronteras. Si los 4 electrodos se encontraran lo suficientemente lejos de las fronteras, generarían líneas equipotenciales, las cuales serían cerradas, al no

tener efectos de frontera. Este efecto, se puede observar, si se comparan las figuras 41 y 42. En la fig. 42, las líneas equipotenciales fueron mapeadas cerca de las fronteras del recipiente, por lo que únicamente se tienen equipotenciales abiertas. En el centro de las figuras 41 y 42(b), se observa una área en forma circular, de radio $d/10$ donde d es la distancia del centro del modelo a cada uno de los electrodos. El ángulo de abertura que debe existir entre cada electrodo debe ser 90° ; con este valor y con la disposición de los electrodos mencionada en el capítulo 3, se logra la máxima linealidad entre las equipotenciales.

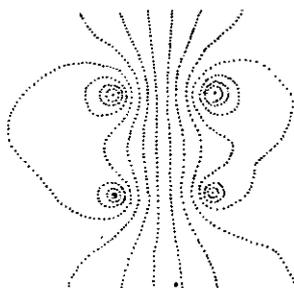


Figura 41. Líneas equipotenciales mapeadas sobre un papel, en un recipiente rectangular para el modelo experimental de 4 electrodos del DOPEL SC50, los valores están dados en mV.

El modelo matemático del prototipo experimental, se muestra en la figura 42(b). En este gráfico se aprecia la acción entre electrodos; cada uno de ellos interactúa con otros dos, los cuales se encuentran a otro potencial. El modelo es una superposición del arquetipo obtenido para un sistema con dos electrodos puntuales.

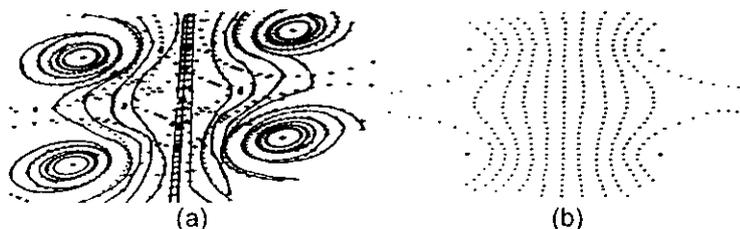
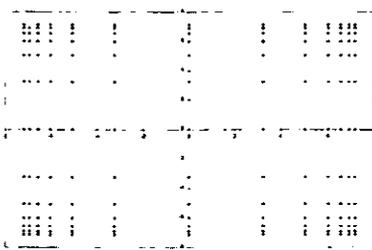


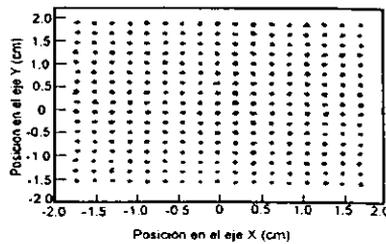
Figura 42. Modelo con coordenadas bipolares utilizado para representar puntos equipotenciales de la nueva disposición de electrodos y fronteras del DOPEL. (a) Líneas equipotenciales obtenidas experimentalmente, para el mismo modelo. (b) Modelo con coordenadas dipolares. Se trazan las líneas de las equipotenciales para una mejor visualización. La inclinación de la imagen se debe a un desplazamiento en las coordenadas de los puntos considerados como electrodos.

En las figuras anteriores se observa que el modelo matemático difiere del gráfico experimental debido a los efectos de borde que presenta el modelo experimental. Estos efectos producen que las líneas equipotenciales tengan una deflexión poco antes de llegar al borde, esto se debe a que la resistividad eléctrica entre la frontera aislante y la superficie conductora, atrae a las líneas haciéndolas salir en forma perpendicular, según se explica en el apéndice B. Teóricamente, si se contara con una superficie de fronteras infinitas, se tendrían líneas equipotenciales representadas por círculos concéntricos, los cuales incrementarían su radio conforme se alejaran de los puntos donde se encuentran los dipolos. Esto representa un tema de futuras investigaciones.

La nueva geometría de electrodos y fronteras del modelo para el DOPEL, permite tener un área de respuesta lineal mucho mayor que con la estructura del detector tradicional; este resultado se muestra en las figuras 43(A) y (B) donde se comparan los puntos digitalizados del DOPEL SC50 y el modelo propuesto. Esta nueva distribución generará una mayor área útil en el detector, permitiendo con ello obtener una estructura que admite mediciones de posición de un haz con mucha mayor eficiencia y precisión. En la figura 43(C), se observa que la superficie donde las líneas equipotenciales presentan una respuesta lineal aumenta, este comportamiento lineal está justificado pues las líneas equipotenciales son círculos concéntricos, sin embargo el área lineal tiene un límite máximo, indicado en la figura por un círculo negro, señalando la región donde la detección es proporcional a la posición.



(a)



(b)

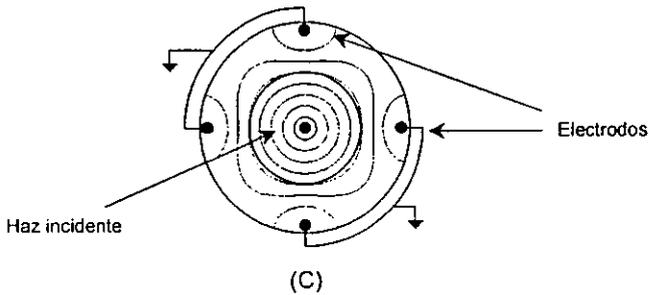


Figura 43. (A) Distribución de líneas equipotenciales para el DOPEL SC50. (B) Distribución de líneas equipotenciales para el nuevo modelo. (C) Líneas equipotenciales para un haz incidente en el centro para una configuración de 2 pares de electrodos con fronteras. El círculo negro indica la región donde la detección es proporcional a la posición.

La no-linealidad que presenta el DOPEL en su área fotosensible, produce problemas que van desde una diferencia en la respuesta absoluta en la determinación de la posición del haz, hasta cambios en la respuesta relativa. Esto tiene varias consecuencias:

1. Si la radiación incidente no se encuentra distribuida uniformemente sobre el área sensible del detector o la distribución de la irradiancia en un detector no-uniforme cambia de una fuente de calibración a otra, la respuesta obtenida mediante la calibración será incorrecta.
2. Los campos magnéticos pueden cambiar tanto la respuesta absoluta relativa como la absoluta debido a que los electrones en ciertas áreas, son deflectados y consecuentemente no contribuyen a la respuesta final del detector.

La nueva disposición eliminaría los problemas anteriores y redituaría en grandes beneficios para aquellos industriales que trabajen en la elaboración de detectores ópticos, pues el área de fotodetección se incrementaría permitiendo un aprovechamiento mucho mayor del material en el armado del DOPEL.

4.3. Detección del haz

En el caso del DOPEL, el punto de incidencia del haz se convierte en una fuente de carga o fotocorriente inducida, que viaja lateralmente hacia los electrodos colectores, en el mismo plano, a través de las líneas de campo. Si se

utiliza la geometría mostrada en la figura 44, se obtiene un área aproximadamente del 95% donde se presenta linealidad. Esto reditúa en una mayor área de detección y la eliminación de elementos electrónicos adicionales para rectificar la posición del haz. La diferencia de potencial entre los electrodos la cual es independiente de la distancia del centroide del rayo incidente hacia los electrodos permite detectar la posición del haz.

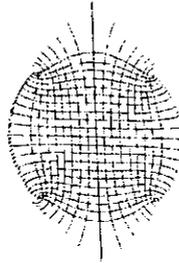


Figura 44: Nueva distribución de electrodos colectores, los cuales permiten obtener un área lineal mayor.

Esta mejora en la detección del haz permite detectar la posición del haz con mayor precisión obteniendo una respuesta lineal en una mayor parte de la superficie fotodetectora según se muestra en la figura 45 (B) y (C). Esta nueva distribución de los electrodos corrige el problema de la alinealidad. Sin embargo, el análisis de la localización del haz en función de la posición de los electrodos, es tema de futuras investigaciones. En la fig. 45(B), se observa que con el modelo final propuesto, las líneas de campo eléctrico son radiales y, por lo tanto, toda la superficie es lineal.

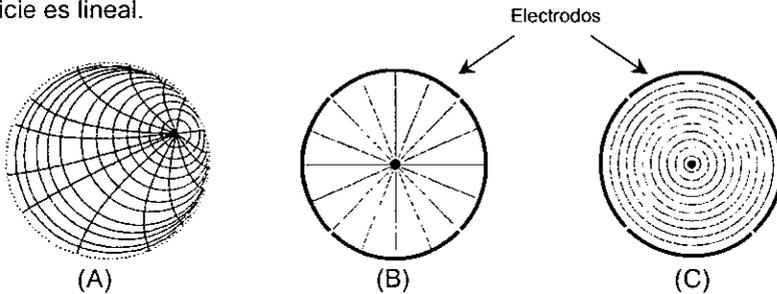
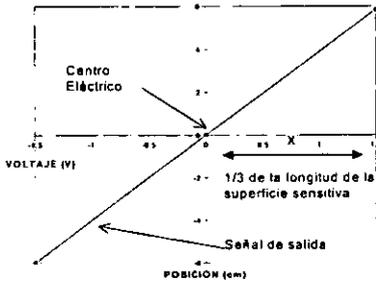


Figura 45. (A) Punto de incidencia del haz en una superficie donde los electrodos colectores se encuentran distribuidos, en la frontera, en forma circular. Líneas de (B) campo eléctrico y (C) equipotenciales para un haz incidente en el centro de una configuración circular conductora.

La propiedad que tiene la respuesta del detector de ser proporcional a la posición dentro de cierto intervalo depende del error en la detección de la posición, la cual se determina mediante un circuito especializado. Cuando la luz incide sobre la superficie sensitiva del detector, las señales de posición pueden ser obtenidas mediante el circuito de determinación de posición. Si las señales de posición son graficadas a lo largo del eje de las ordenadas y las posiciones sobre la superficie sensitiva a lo largo del eje de las abscisas, se obtiene una gráfica como la mostrada en la figura 46.



(A)

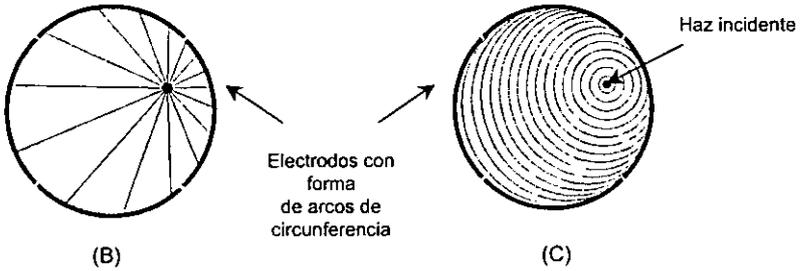


Figura 46: (A) Gráfica de señales de posición contra posiciones sobre la superficie sensitiva en el modelo nuevo. Líneas de (B) campo eléctrico y (C) equipotenciales para un haz incidente fuera de centro en una configuración circular conductora

En ésta se observa que el punto del centro eléctrico está en la posición donde la señal es cero. La línea recta que conecta el punto del centro eléctrico y la posición de la señal, tiene una longitud en el primer cuadrante que es proporcional a 1/3 de la magnitud total de la superficie sensitiva a partir del centro eléctrico y se toma como línea de referencia. Con este nuevo modelo el área sensitiva efectiva se incrementa.

CONCLUSIONES GENERALES

Los fotodetectores han tenido exitosas aportaciones en la observación de objetos astronómicos. Su aplicación se extiende a campos como la fotometría, espectroscopía, interferometría y polarimetría; por ello es de gran importancia el análisis del sistema de detección mismo a fin de optimizar su funcionamiento. Para tal efecto se requiere de modelos experimentales factibles de ser implementados y de bajo costo.

El potencial electrostático permite tanto caracterizar como determinar el área máxima utilizable en un fotodetector basadas en las características de las líneas equipotenciales, tales como:

1. Las líneas de un campo eléctrico son normales a las superficies equipotenciales.
2. La superficie de un conductor es equipotencial, lo cual permite caracterizar mediante un modelo experimental el comportamiento de las equipotenciales en un fotodetector.

El comportamiento de las trayectorias que siguen las corrientes generadas en el punto de incidencia de las superficies conductoras hacia los electrodos, permite describir la respuesta del fotodetector. Para el DOPEL SC50, esta respuesta no es lineal en toda la superficie, aunque la alinealidad en el centro es pequeña.

El dispositivo experimental permite una clara visualización de las líneas equipotenciales, facilitando la comprensión del concepto. Si se utiliza este dispositivo en aplicaciones donde se requiera de una mayor precisión de las líneas, es suficiente con aumentar las proporciones del modelo utilizando generadores y medidores más estables; lográndose aumentar en orden de magnitud en la reproducción de la posición. Esta visualización de las líneas equipotenciales permite prever la geometría idónea para los electrodos y frontera de la superficie conductora que proporcionen una respuesta lineal en la posición

dentro del área del detector; esto mejora considerablemente la región útil si se adopta la nueva disposición y geometría de los elementos involucrados.

En el caso del detector de adquisición de imágenes por conteo de fotones, existe el mismo problema de no-linealidad que presenta el SC50, para aumentar la superficie donde la no-linealidad es menor al 15%, se sugieren geometrías de frontera limitadas por arcos de círculo, mostradas en la figura 15, donde se mejora la linealidad en el 14% de la superficie total.(c.f. Apéndice A)

Para el DOPEL SC50, el análisis experimental de la superficie permite presentar un modelo con una redistribución de los detectores, así como el de la geometría del detector; de forma tal que los electrodos se dispongan por pares diametralmente separados conectados a diferentes potenciales con fronteras circulares del detector; esto permite obtener un comportamiento del área resistiva en el cual el 100% de la superficie sensible presenta una no-linealidad menor al 1%.

La no-linealidad que presenta el DOPEL en su área fotosensible, produce problemas que van desde una diferencia en la respuesta absoluta en la determinación de la posición del haz, hasta cambios en la respuesta relativa. Esto tiene varias consecuencias:

1. Si la radiación incidente no se encuentra distribuida uniformemente sobre el área sensible del detector o la distribución de la irradiancia en un detector no-uniforme cambia de una fuente de calibración a otra, la respuesta obtenida mediante la calibración será incorrecta.
2. Los campos magnéticos pueden cambiar tanto la respuesta absoluta relativa como la absoluta debido a que los electrones en ciertas áreas, son deflectados y consecuentemente no contribuyen a la respuesta final del detector.

La nueva disposición eliminaría los problemas anteriores y redituaría en grandes beneficios para aquellos industriales que trabajen en la elaboración de detectores ópticos, pues el área de fotodetección se incrementaría permitiendo un aprovechamiento mucho mayor del material en el armado del DOPEL.

Algunas compañías^[8], utilizan algoritmos controlados por software y correcciones de calibración almacenadas en memoria a fin de linealizar la respuesta del detector y obtener una calibración precisa sobre toda la superficie detectora. Esta característica de linealización implica un uso innecesario de subsistemas que hacen más compleja la adquisición de datos y dificulta la obtención de mediciones precisas sobre toda la superficie.

Estos resultados se obtienen combinando únicamente geometrías de electrodos y fronteras, sin adicionar elementos externos activos o pasivos, por lo que su implementación en la fabricación de detectores es relativamente sencilla. Al lograrse una superficie mayor donde la alinealidad es menor al 1%, permite aumentar el área útil en los detectores ópticos. En el Mepsicrón se aumentaría el área útil de las placas microcanales, así como la disminución del tamaño, lo que permite un aumento en la cantidad de píxeles de la imagen.

El modelo matemático propuesto, representa adecuadamente el comportamiento de las equipotenciales de DOPEL, sin embargo difiere del gráfico experimental debido a los efectos de borde, presentados en el modelo experimental. Estos efectos producen que las líneas equipotenciales tengan una deflexión poco antes de llegar al borde. Teóricamente, si se contara con una superficie de fronteras infinitas, se tendrían líneas equipotenciales representadas por círculos concéntricos, los cuales incrementarían su radio conforme se alejaran de los puntos donde se encuentran los dipolos. Esto representa un tema de futuras investigaciones.

APENDICE A

Determinación de la superficie sensible del fotodetector

La determinación de la superficie sensible del fotodetector, depende de la geometría del detector mismo y del concepto de no-linealidad. La respuesta, en la posición, del DOPEL presenta una gráfica de la forma $X = A \tan\left(\frac{V_x}{B}\right)$. Para ajustar la curva a una línea recta, se propone un intervalo de linealidad alrededor de los puntos de la gráfica de respuesta, representado por el espacio entre las dos líneas rectas punteadas, según se muestra en la fig. 46; sin embargo el área de respuesta lineal depende de este intervalo; ésta tiene una variación inversa respecto al intervalo de linealidad en la gráfica, es decir:

$$P_{lineal} = \frac{A_s}{A_D}$$

donde P_{lineal} representa el porcentaje de linealidad requerido en el detector, A_s la superficie sensitiva y A_D el área de detección.

Para aclararlo, en los siguientes párrafos se presenta un ejemplo.

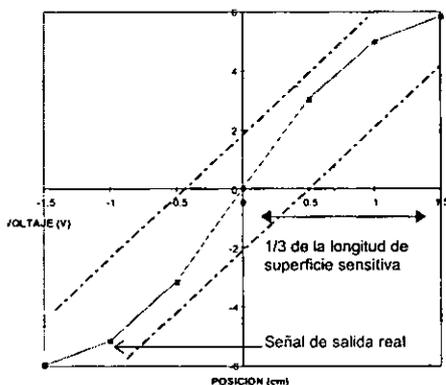


Figura 46. Para ajustar la curva a una línea recta, se propone un intervalo de linealidad alrededor de los puntos de la gráfica de respuesta, representado por el espacio entre las dos líneas rectas punteadas.

Supongamos que se desea un porcentaje de linealidad del 66%, es decir $P_{\text{lineal}} = 2/3$ y se cuenta con un detector de frontera circular de radio r . Sea $2r$ el radio del círculo que representa el área total del detector, según se muestra en la figura 47.

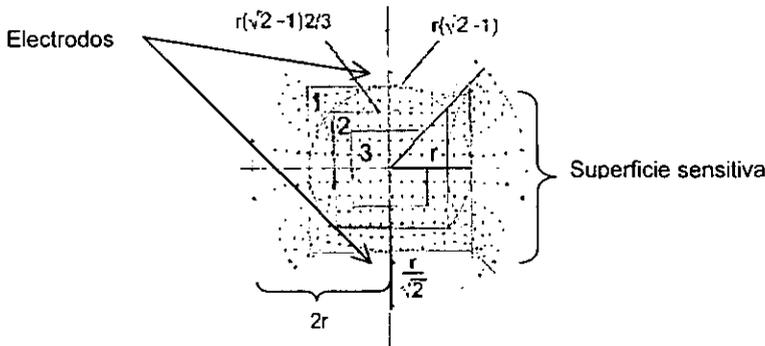


Figura 47. Geometría utilizada por fabricantes del detector de posición para linealizar la respuesta en posición. Se muestran los valores utilizados para determinar el área de respuesta lineal. El número 1 indica la superficie sensible, el 2 indica la superficie de respuesta lineal del 66% y el 3 representa un área de linealidad mayor entre el 66% y el 70%.

Así, la superficie sensitiva tiene un valor de $A_s = \frac{2r(\sqrt{2}-1)}{3}$ puesto que cada lado del cuadrado que determina ésta superficie mide $r(\sqrt{2}-1)$.

El lado y el área del cuadrado de detección miden $2r(\sqrt{2}-1)$ y $A_D = \frac{4r^2(\sqrt{2}-1)}{3}$, respectivamente.

De lo anterior se tiene que si $r = 1$, entonces:

- Área total será $A_T = 3.1416$.
- Área del cuadrado de la superficie de detección $A_D = 0.5523$, lo cual representa el 17.58% del total de la superficie e implica un desperdicio del 82.42%.
- Área del cuadrado sensitivo $A_S = 0.2761$, lo cual representa el 8.78% del total de la superficie y el 49.9% del área de detección.

APENDICE B

Condiciones en la frontera sobre el campo eléctrico

El campo eléctrico experimenta una variación al pasar por una zona interfacial entre dos medios. Los medios pueden ser dos dieléctricos con diferentes propiedades, o un dieléctrico y un conductor.

Considérese dos medios en contacto, 1 y 2, como se ilustra en la fig. 49. Supóngase que hay una densidad superficial de carga externa, σ , que puede variar de un punto a otro en la zona entre los medios.



Figura 49: Las condiciones en la frontera sobre los vectores de campo en la zona interfacial entre dos medios pueden obtenerse aplicando la ley de Gauss a S e integrando $E \cdot d\vec{l}$ a lo largo de la trayectoria ABCDA.

Constrúyase ahora una pequeña superficie S en forma de caja, que intersecta dicha zona y encierra un área ΔS de ésta, siendo la altura de la caja despreciablemente pequeña comparada con el diámetro de las bases. La carga encerrada por S es

$$\sigma \Delta S + \int_2 (\rho_1 + \rho_2) \times \text{volumen} \quad (18)$$

pero el volumen de la caja es despreciablemente pequeño, de modo que el último término puede despreciarse. Aplicando la ley de Gauss a S , se tiene que

$$\vec{D}_2 \cdot \vec{n}_2 \Delta S + \vec{D}_1 \cdot \vec{n}_1 \Delta S = \sigma \Delta S$$

o

$$(\vec{D}_2 - \vec{D}_1) \cdot \vec{n}_2 = \sigma \quad (19)$$

donde D_1 y D_2 son los vectores de desplazamiento eléctrico de los medios en contacto^[11].

Como n_2 puede servir como la normal a la zona intermedia,

$$D_{2n} - D_{1n} = \sigma \quad (20)$$

Así pues, la discontinuidad en la componente normal de D está dada por la densidad superficial de carga externa sobre la zona intermedia; dicho de otra forma, si no hay carga en la zona entre dos medios, la componente normal de D es continua.

Debido a que el campo electrostático puede obtenerse como el gradiente de un potencial (c.f. cap. 2.1.2), la integral de línea de $\vec{E} \cdot d\vec{l}$ alrededor de cualquier trayectoria cerrada se anula. Aplicando este resultado a la trayectoria rectangular ABCD, las longitudes AB y CD se considerarán iguales a Δl y los segmentos AD y BC se supondrán despreciablemente pequeños. Por consiguiente

$$E_2 \cdot d\vec{l} + E_1 \cdot (-\Delta\vec{l}) = 0$$

o bien

$$(\vec{E}_2 - \vec{E}_1) \Delta\vec{l} = 0 \quad (21)$$

De la ecuación (21) se obtiene que $E_{2t} = E_{1t}$, esto es, la componente tangencial del campo eléctrico es continua al atravesar la zona intermedia. En el caso de que uno de los medios sea conductor, contiene cargas móviles, como no hay fuerza molecular restauradora sobre las cargas libres del conductor, es decir el movimiento continúa hasta que la redistribución de las cargas en el conductor produce un campo que cancela los efectos del campo eléctrico externo, para un conductor se tendría $\epsilon = \infty^2$. Si el medio se considera conductor, entonces se concluye que $E_1 = 0$, entonces de la ecuación (21) se obtiene que $E_{2t} = 0$. Cabe mencionar que el campo en el dieléctrico es siempre perpendicular a la superficie del conductor^[10], de acuerdo a la ecuación (21). Sobre la base de argumentos puramente físicos, se hace evidente que el potencial ϕ debe ser continuo a través de la zona entre los medios. Esto se debe a que la diferencia de potencial, $\Delta\phi$,

² Este resultado se obtiene a partir de su definición, puesto que la permitividad del material se relaciona con la susceptibilidad eléctrica y dado que $\chi = \infty$ para un conductor.

entre dos puntos muy próximos es $E \cdot \Delta l$ donde Δl es la separación de los dos puntos y, de lo anteriormente expuesto, no hay motivo para que E sea infinito en la zona intermedia. En realidad la continuidad del potencial es una condición de frontera.

APENDICE C

Cálculo de la resolución de la posición

Considérese un detector óptico de posición de un solo eje, el cual genera corrientes I_1 e I_2 , hacia cada uno de sus electrodos (c.f. fig. 6). Según la ec. 2, la posición (X), en el eje, esta dada por

$$X = \frac{I_2 - I_1}{I_1 + I_2} L$$

Sin embargo, existe una incertidumbre en los valores de las corrientes I_1 e I_2 . Así, la posición medida es:

$$X_{\max} = \left[\frac{(I_2 \pm n_2) - (I_1 \pm n_1)}{(I_1 \pm n_1) + (I_2 \pm n_2)} \right] L \quad (23)$$

donde n_1 y n_2 son las incertidumbres en la medición de las corrientes generadas.

El error máximo ocurre cuando ambas señales son negativas y aproximadamente de igual valor. La posición máxima medida es:

$$X_{\text{med}(\max)} = \left[\frac{I_2 - I_1}{I_1 + I_{1+n}} \right] L \quad (24)$$

La razón señal-ruido (S) es:

$$S = \frac{I_1 + I_2}{n} \quad (25)$$

Si se resuelve para n y se sustituye en la ecuación (24), para obtener el valor máximo de error en términos de la razón de señal-ruido, la cual se puede controlar y estimar fácilmente. Así:

$$X_{\max} = \left[\frac{I_2 - I_1}{I_1 + I_2 - \left(\frac{I_1 + I_2}{S} \right)} \right] L \quad (26)$$

$$X_{\max} = \frac{S}{S-1} \left(\frac{I_2 - I_1}{I_1 + I_2} \right) L$$

lo cual representa el peor de los casos de error en la medición.

La varianza del error está dada por:

$$\delta S = \left(\frac{1}{S+1} \right) L$$

Si $S \gg 1$, entonces:

$$\delta S = \frac{L}{S} \quad (27)$$

Para un fotodetector tetralateral típico de 10x10 mm, se puede esperar un ruido equivalente de 40 nA y un máximo de señal de 200 μ A, aproximadamente. Así que el ruido es igual a 1 micrón.

La resolución de la posición no se debe confundir con precisión o linealidad. La resolución es independiente de estas propiedades, las cuales son intrínsecas al tipo de detector y no a la razón señal-ruido del sistema.

REFERENCIAS

- [1].- Raymond, A., et. al, "*Noninvasive Measurement of Corneal Topography*", IEEE Engineering in Medicine and Biology, Enero 1995, p. 30-41.
- [2].- Ruiz Schneider, E., "*Mepsicrón. Nuevas perspectivas*", Instituto de Astronomía, UNAM. (1994).
- [3].- Millman, J., "*Integrated Electronics: analog and digital circuits and systems*", ed. McGraw-Hill , p. 33-35.
- [4].- Firmani, C., et. al., "*High-resolution imaging with a two-dimensional resistive anode photon counter*", Rev. Sci Instrum, Vol. 52, (5), 1982.
- [5].- Hamamatsu Photonic, "*PIAS-TI, Photon Counting Image Acquisition System*", Catálogo, 1990, p. 5
- [6].- Melles, G., "*Simple optics for photodetector systems*", Optics Guide 5, 1995-1996, pag. 62-1.
- [7].- Nogueira, A., González, M., "*Influencia de la geometría de los electrodos en la respuesta de la superficie de detectores ópticos*", Memorias SOMI XII Congreso de Instrumentación, San Luis Potosí, 1997.
- [8].- Nogueira, A., González, M., "*Equipo para observar líneas de campo y equipotenciales con aplicaciones de investigación y didácticas*", Memorias SOMI XII Congreso de Instrumentación, San Luis Potosí, 1997.
- [9].- $\pm 1 \mu\text{m}$ ó $\pm 0.25 \%$ del diámetro del rayo, que siempre es mayor (para desplazamiento, es menor al 5% del diámetro del haz desde el centro de la superficie detectora. Melles Griot, "*Simple optics for photodetector systems*", Optics Guide 5, 1995-1996, pag. 62-1
- [10].- Reitz, J., et. al., "*Fundamentos de la teoría electromagnética*", Fondo Educativo Interamericano, 3ª. Edición, p. 96.

[11].- Se acostumbra a dar el nombre de *desplazamiento eléctrico* a la combinación de $\epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$ y se simboliza por \mathbf{D} . En un dieléctrico isótropo, \mathbf{D} es simplemente $\epsilon_0 \epsilon \mathbf{E}$, pues la relación $\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_{\text{libre}}$, donde ρ_{libre} representa una densidad de carga libre, se cumple en cada caso en que puedan definirse las magnitudes macroscópicas \mathbf{P} , \mathbf{E} y ρ .

BIBLIOGRAFIA

1. Alberti, S.B., Radeka, V., IEEE Trans. Nucl. Sci., **NS-23**, (1), 251 (1976).
2. Budde, W., "*Physical Detectors of Optical Radiation*", Vol. 4, Academic Press (1983).
3. Castobli, A., et. al., Nucl. Instrum. Meth., **A409**, 379, (1998)
4. Firmani, C., et. al., "*High-resolution imaging with a two-dimensional resistive anode photon counter*", Rev. Sci Instrum, Vol. **52**, (5), (1982).
5. Firmani, C, et. al., "*El Mepsicron*", Rev. Mex. Física, Vol. **31**, (3), (1985), p 503-519.
6. Glenn, F., "*Radiation Detection and Measurement*", 3ª. ed., John Wiley & Sons, (1999).
7. González, M., Nogueira, A, Díaz, R., "*Caracterización de un detector de posición bidimensional de haces luminosos*", Memorias SOMI, XI Congreso de Instrumentación, Morelia Mich., (1996).
8. Hamamatsu Photonic, "*PIAS-TI, Photon Counting Image Acquisition System*", Catálogo, (1990).
9. Hamamatsu Photonic, "*Position-Sensitive Detectors*", Catálogo, (1987).
10. Jones, G., "*El campo eléctrico*", Boixareau Editores, (1985).
11. Kaufman, S.B., et. Al., Nucl. Instrum. Meth., **82**, 117, (1970).
12. Lampton, F., Parece, Rev. Sci. Instr, **45**, (1974).
13. Lampton, F., Parece, Rev. Sci. Instr, **50**, (1979).
14. Maxwell, J. C., "*A treatise on electricity and magnetism*", Vol. I.
15. Millman, J., "*Integrated Electronics: analog and digital circuits and systems*", ed. McGraw-Hill (1971).
16. Murray R., S., "*Análisis Vectorial*", ed. McGraw-Hill (1988).
17. Nogueira, A., González, M., "*Influencia de la geometría de los electrodos en la respuesta de la superficie de detectores ópticos*", Memorias SOMI XII Congreso de Instrumentación, San Luis Potosí, (1997).

18. Nogueira, A., González, M., "*Equipo para observar líneas de campo y equipotenciales con aplicaciones de investigación y didácticas*", Memorias SOMI XII Congreso de Instrumentación, San Luis Potosí, (1997).
19. Norton, N. H., "*Sensores y Analizadores*", Editorial Gustavo Gili S.A., (1984).
20. Onerdick, M., et. al., Nucl. Instrum. Meth., **A392**, 173 (1997).
21. Purcell, E.M., "*Electricidad y magnetismo*", 2ª ed., Vol. 2., Reverté S.A. (1981).
22. Reitz, R. J., et. al., "*Fundamentos de la Teoría Electromagnética*", 3ª. ed., Fondo Educativo Interamericano (1983).
23. Sears, F. W., "*Fundamentos de Física. Óptica*", , 4ª. ed., Aguilar (1979).
24. Sinclair, I. R., "*Sensors and Transducers*", *BSP Professional Books*, (1988).
25. UDT, "*Model 301DIV Signal Conditioning Amplifier*", Manual de referencia (1997).
26. Williams D.C., "*Optical Methods in Engineering Metrology*", Chaspman & Hall (1998).