

Capítulo II. Sensores capacitivos planos

II.1. Sensor

Un sensor es un dispositivo que convierte una señal mecánica, óptica o eléctrica en otra señal de naturaleza eléctrica. La información que muestra un sensor proporciona los cambios que ocurren en un experimento ya sea físico (óptico) y químico.

Un sensor también es llamado transductor pasivo. Un transductor es un dispositivo que es capaz de transformar o convertir algún tipo de energía en otra (transductor activo), un transductor pasivo convierte energía de una naturaleza en otra de la misma naturaleza (ver figura II.1).

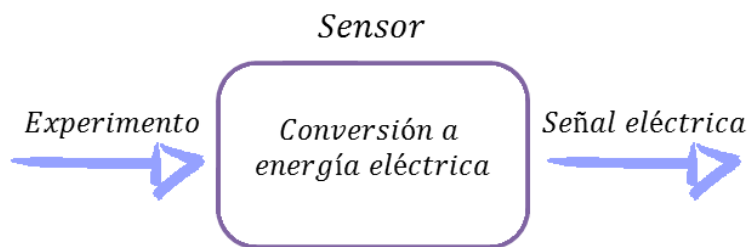


Figura II.1 Conversión de energía.

II.2. Sensor capacitivo plano

Un sensor capacitivo es un dispositivo que induce un campo eléctrico a un material bajo prueba (MBP). El campo eléctrico que se induce al MBP es provocado por la diferencia de potencial entre los electrodos del sensor. La corriente eléctrica que pasa a través del MBP contiene una componente real (i) y una imaginaria (ji). Dicha corriente dependerá de los cambios que ocurran en la muestra (los factores que afectan directamente la medición pueden ser las vibraciones, la temperatura, la luz, la calidad del aire y la humedad) [1].

Un sensor capacitivo puede estar formado por dos electrodos conductores planos, paralelos entre sí, con una distribución del campo eléctrico producido tal como se puede observar en la figura II.2. Cuando la posición de los electrodos cambia, como se ve en la figura II.3 la distribución del campo eléctrico entre los electrodos también cambia. Finalmente, en la figura II.4 se puede observar la distribución del campo eléctrico cuando la posición de los electrodos cambia

180°. Cuando los electrodos forman un ángulo de 180° se dice que es un capacitor de electrodos planos.

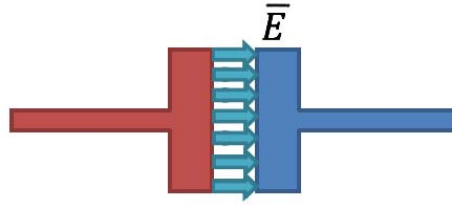


Figura II.2. Capacitor de electrodos paralelos.

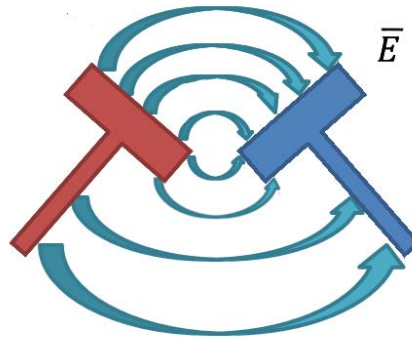


Figura II.3. Capacitor con un ángulo entre electrodos.

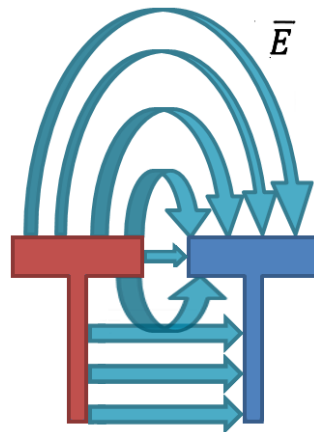


Figura II.4. Capacitor de electrodos planos.

Cuando los electrodos de un sensor capacitivo plano se depositan sobre un sustrato (dieléctrico), se tendrá una capacitancia debida al sustrato y otra debido al cable (ver figura II.5).

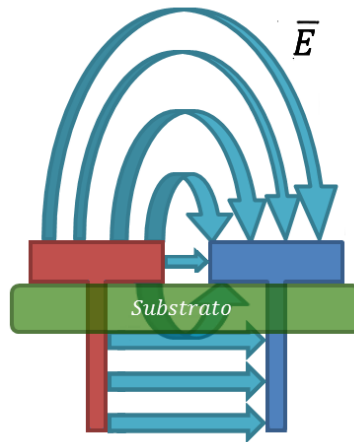


Figura II.5. Sensor capacitivo plano.

II.3. Sensor capacitivo con plano de tierra

El plano de tierra sirve para controlar las líneas del campo eléctrico \vec{E} y reducir los efectos de borde del sensor. La dirección de las líneas de campo eléctrico del sensor tienden a fluir hacia donde el potencial sea nulo ($V = 0[V]$); es por ello que el plano de tierra se coloca detrás del sustrato, como se muestra en la figura II.6a. Cuando se coloca un plano de tierra la medición se concentra solamente en el *área sensible* del sensor como se muestra en la figura II.6b.

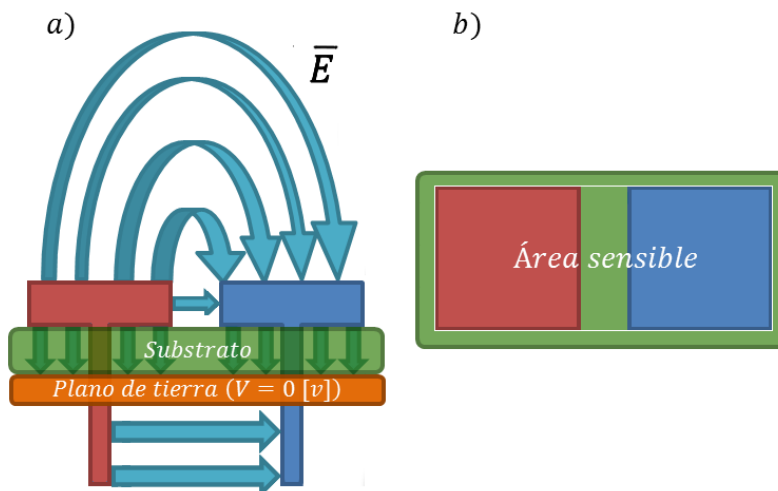


Figura II.6. Sensor capacitivo con plano de tierra.

II.4. Simulación de un sensor capacitivo tipo peine

Para el estudio de sensores planos en peine, se ha profundizado en el análisis del campo eléctrico cambiando la geometría de los electrodos en vez de su posición. El cambio de la geometría de los electrodos provoca una distribución diferente de las líneas del campo eléctrico en cada configuración y con ésta es posible elegir el diseño para una aplicación determinada.

La geometría de los electrodos del sensor utilizada en este trabajo de tesis, está basada en una configuración ya conocida llamada “*tipo peine*”. La cualidad de ésta configuración es que permite hacer mediciones para películas de un MBP con poca restricción del área sensible; esto es, si se realiza un cambio en las dimensiones del sensor es posible abarcar áreas diferentes. El área sensible dependerá de la aplicación requerida.

Para observar la distribución del potencial eléctrico y de las líneas del campo eléctrico de un sensor capacitivo tipo peine se realizaron simulaciones por medio del Método de Elemento Finito (MEF). Dicho método permite visualizar la distribución de las líneas del campo eléctrico así como la distribución del potencial eléctrico, intercambiando las constantes dieléctricas y espesores de substratos diferentes. En la figura II.7 se muestra la distribución del campo eléctrico, la distribución del potencial eléctrico y la geometría de los electrodos que componen al sensor capacitivo [3].

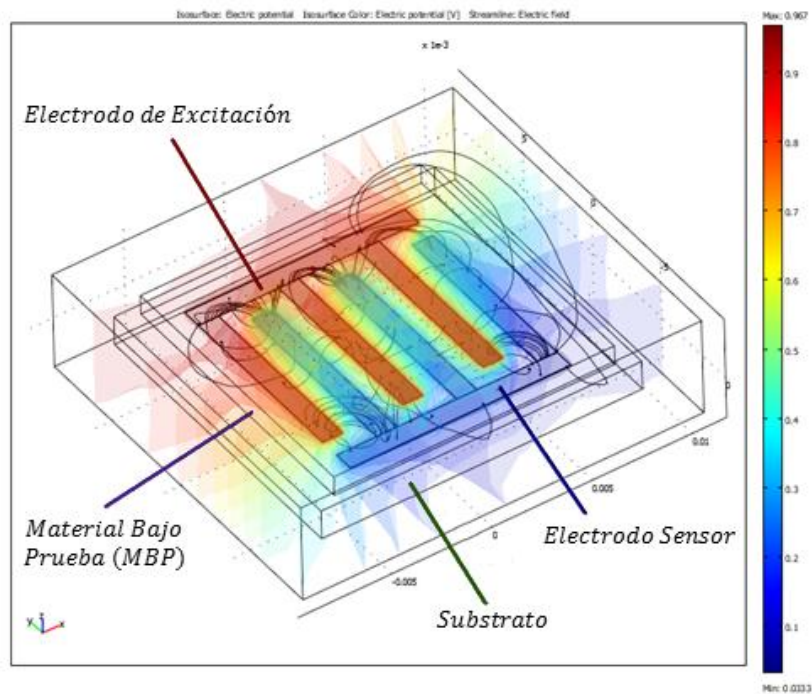


Figura II.7. Simulación por el Método de Elemento Finito (MEF).

La capacitancia total se puede calcular con la expresión

$$C = \frac{Q}{V}, \quad (II.1)$$

donde V es la diferencia de potencial aplicada a los electrodos y Q es la carga total encerrada en los electrodos tipo peine que son los positivos, la carga total encerrada se puede calcular mediante la ley de Gauss de la siguiente forma

$$Q = \varepsilon_1 \oint \vec{E} \cdot d\vec{S} + \varepsilon_2 \oint \vec{E} \cdot d\vec{S}, \quad (II.2)$$

E : Campo eléctrico.

ε_1 : Permitividad del sustrato.

ε_2 : Permitividad del Material Bajo Prueba (MBP).

$d\vec{S}$: Diferencial de superficie donde el campo eléctrico es aplicado.

La ecuación II.2 establece que la carga total encerrada por una superficie $d\vec{S}$ se obtiene como la suma de las contribuciones de los materiales dieléctricos que se encuentran encerrados dentro de la superficie cerrada (el sustrato y el MBP). El producto de la permitividad absoluta ε_1 por la integral de superficie cerrada del campo eléctrico por la diferencial de superficie muestra la contribución de la permitividad del sustrato. El producto de la permitividad absoluta ε_2 por la integral de superficie cerrada del campo eléctrico por la diferencial de superficie muestra la contribución del MBP.

La forma integral de la diferencia de potencial (ver apéndice A) se define como:

$$V = \int \vec{E} \cdot d\vec{L} \quad (II.3)$$

Sustituyendo las ecuaciones (II.2) y (II.3) en (II.1) la forma integral de la capacitancia queda

$$C = \varepsilon_1 \frac{\oint \vec{E} \cdot d\vec{S}}{\int \vec{E} \cdot d\vec{L}} + \varepsilon_2 \frac{\oint \vec{E} \cdot d\vec{S}}{\int \vec{E} \cdot d\vec{L}} \quad (II.4)$$

Como no se tiene una ecuación que represente al campo eléctrico se realizaron simulaciones del sistema de la figura II.7, cambiando la permitividad del MBP para diferentes espesores como se muestran en las figuras II.8 y II.9.

De las simulaciones realizadas se observó que si la superficie de los electrodos se incrementa o la separación entre ellos disminuye la capacitancia aumenta. En este caso el ancho de los electrodos es igual a la separación entre los electrodos paralelos del sensor.

II.5. Linealidad

Cuando se trabaja con campos eléctricos \overline{E} de baja intensidad se tienen curvas no lineales, pero si se realizan mediciones cercanas al origen las lecturas se aproximan a líneas rectas con una cierta pendiente como las mostradas en la figura II.8 [1].

II.6. Sensibilidad

La sensibilidad del sensor (s) está definida como la razón de cambio entre la salida del sensor en función de los cambios de alguna variable del sistema, ya sea el espesor o la permitividad [1]. Para los casos mostrados en la figura II.8, la forma lineal de la sensibilidad esta descrita por

$$\Delta C = s\Delta\varepsilon_r . \tag{II.5}$$

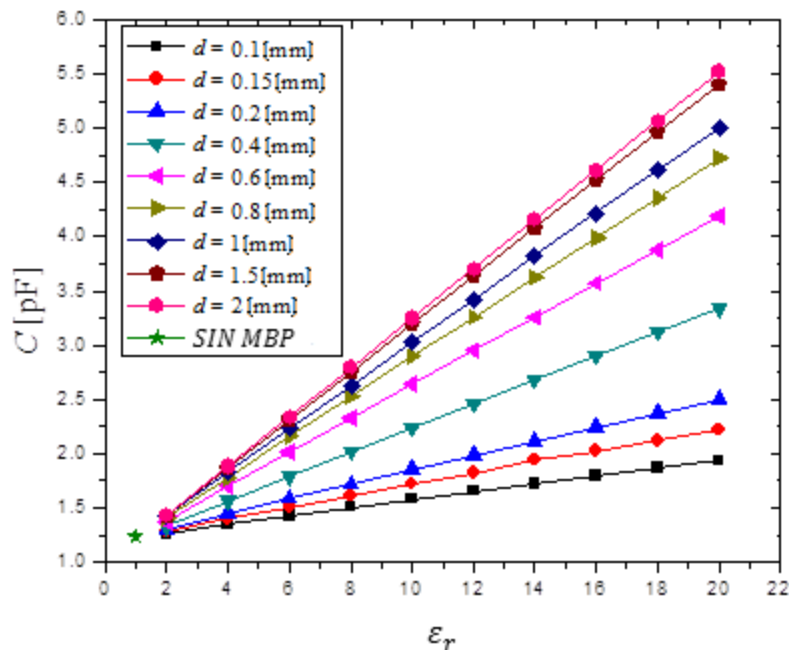


Figura II.8. Capacitancia para diferentes espesores del Material Bajo Prueba (MBP) variando su permitividad relativa.

En la figura II.8 se representan variaciones lineales de la capacitancia en función del espesor (d) del MBP con una permitividad relativa (ϵ_r). El mínimo valor de la capacitancia corresponde a un MBP de permitividad relativa $\epsilon_r = 1$, que corresponde a cuando no se tiene MBP. Las gráficas mostradas se obtienen incrementado el valor de la permitividad relativa a diferentes espesores. Se puede observar que para espesores del MBP entre 1.5 [mm] y 2 [mm] las variaciones de la capacitancia disminuyen y para $d \geq 2$ [mm] éstas tienden a mantenerse sin cambio. [3]

Observe que para encontrar la sensibilidad (s) entre dos puntos de una recta se puede calcular mediante la ecuación (II.5), por ejemplo, con un espesor $d = 2$ [mm], $\epsilon_{r_1} = 6$ y $\epsilon_{r_2} = 8$, se obtienen sus respectivos valores de capacitancias $C_1 = 2.343$ [pF] y $C_2 = 2.797$ [pF], con estos datos la sensibilidad máxima puede calcularse como

$$s = \left. \frac{\Delta C}{\Delta \epsilon_r} \right|_d = \left. \frac{C_2 - C_1}{\epsilon_{r_2} - \epsilon_{r_1}} \right|_{2 \text{ [mm]}} = 0.227 \text{ [pF]}. \quad (\text{II.6})$$

También, con las mismas curvas el espesor d del MBP puede ser estimado por un número dado de electrodos con una separación (g) y área de sensado del sensor capacitivo tipo peine. Del ejemplo anterior mostrado en la ecuación (II.2) se puede observar que el espesor es el doble que la separación entre electrodos

$$d = 2g . \quad (\text{II.7})$$

En vista de lo cual podemos aplicar la ley de escala isotrópica de la capacitancia eléctrica, por tanto se puede decir que este resultado puede ser escalable.

II.7. Profundidad de penetración

La profundidad de penetración es la distancia máxima que tiene el sensor capacitivo para hacer pasar un campo eléctrico \bar{E} a través de un MBP con el cual se obtiene un cambio mínimo en la medición de la capacitancia. En la figura II.9 se puede observar que los cambios son mínimos en la capacitancia (C) cuando se aumenta el espesor (d) a partir 2 [mm] en adelante a cada MBP de permitividad relativa (ϵ_r).

II.8. Rango dinámico

El rango dinámico del sensor es el conjunto de valores medidos en los cuales se conoce el valor máximo y el valor mínimo. Cuando se monitorizan materiales a diferentes espesores las lecturas de capacitancia no son iguales, cuando no se tiene espesor no se tiene objeto, entonces nos referimos a que la lectura es el “standing value”. En la figura II.9 se muestra el rango dinámico para cada dieléctrico de permitividad relativa (ϵ_r).

En la figura II.9 se muestran variaciones no lineales entre las curvas de capacitancia contra el espesor de distintas permitividades relativas de un MBP. La marca de una estrella negra representa el valor de capacitancia del sensor capacitivo tipo peine sin MBP. Observe que el valor mínimo de capacitancia se da cuando no hay MBP sobre la capa sensible, este valor de capacitancia puede corresponder a una permitividad relativa $\epsilon_r = 1$ equivalente a la del aire. En la práctica este valor de capacitancia puede ser la referencia para un valor de calibración inicial, se puede observar que las variaciones con el espesor son más rápidas para espesores pequeños del MBP. Sin embargo como el espesor del MBP se incrementa la variación del valor de capacitancia es menor y presenta una variación mínima cuando el espesor (d) es $d \geq 2 [mm]$ para cada dieléctrico de permitividad ϵ_r como se pudo notar [3].

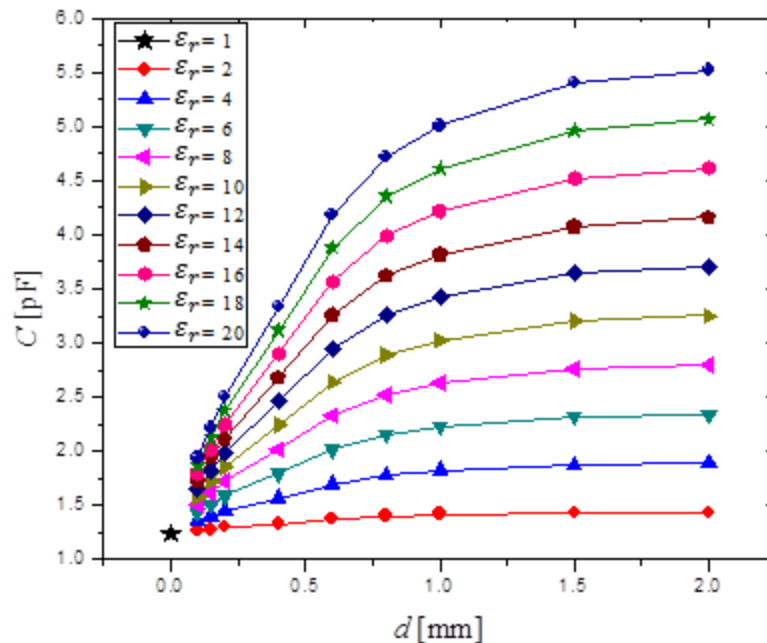


Figura II.9. Capacitancia para diferentes permitividades del MBP variando su espesor.

Es posible determinar el rango dinámico de sensor con las curvas de C contra d , con las condiciones físicas propuestas en las simulaciones. El rango dinámico se define como el 97% del valor de capacitancia máxima en un rango de operación establecido de permitividad relativa ϵ_r y espesor d y un volumen del MBP y es útil para ver qué tan profundo puede penetrar el campo eléctrico a un MBP.

II.9. Referencias

1. Hu, Xiaohui y Yang, Wuqiang, (2010) "Planar Capacitive Sensors – Designs and Applications", *Sensor Review*, Vol. 30 Iss: 1, pp. 24–39
2. Sundara, Kishore y Zahn, Markus, (2006) "Fringing Electric and Magnetic Field Sensors", *Encyclopedia of Sensors*, Volume X: pp. 1-12
3. Guadarrama, Asur y García, Augusto, (2010) "Design Parameters for Interdigitated Capacitance Sensors for Monitoring the Dielectric Constant of Coatings", 1st International Congress on Instrumentation and Applied Sciences, pp. 1-7