



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

**SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN**

‘Diseño y simulación de diferentes configuraciones geometrías de electrodos interdigitales’

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO ELECTRÓNICO**

AUTORES:

- **RENATO ANDRES DUEÑAS MIRANDA**
- **JEFFERSON ANDRÉS TORRES GAVILANES**

TUTOR: ING. BREMNEN VELIZ.

**GUAYAQUIL – ECUADOR
2022**

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL
TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA
SALESIANA**

Nosotros, Renato Andres Dueñas Miranda con documento de identificación N° 0917972598 e Jefferson Andrés Torres Gavilanes con documento de identificación N° 0958391369; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 21 de Febrero de 2022

Atentamente,



**Renato Andres Dueñas Miranda
Gavilanes**

C.I. 0917972598



Jefferson Andrés Torres

C.I.0958391369

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO
DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Renato Andres Dueñas Miranda con documento de identificación N° 0917972598 e Jefferson Andrés Torres Gavilanes con documento de identificación N° 0958391369, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo Académico: Diseño y simulación de diferentes configuraciones geometrías de electrodos interdigitales, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Electrónico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 21 de Febrero de 2022

Atentamente,



**Renato Andres Dueñas Miranda
Gavilanes**

C.I. 0917972598



Jefferson Andrés Torres

C.I. 0958391369

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Bremnen Marino Veliz Noboa con documento de identificación N°0703865139, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: Diseño y simulación de diferentes configuraciones geometrías de electrodos interdigitales, realizado por Renato Andres Dueñas Miranda con documento de identificación N° 0917972598 y por Jefferson Andrés Torres Gavilanes con documento de identificación N° 0958391369 , obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 21 de Febrero de 2022

Atentamente,



PhD. Bremnen Marino Veliz Noboa

C.I. 0703865139

DEDICATORIA

Dedico este artículo científico principalmente a la ciencia, porque el ser humano ha evolucionado por medio del estudio de diferentes ramas. A través de ella se ha conseguido por ejemplo, mejorar el estilo de vida de las personas, descubriendo la cura de muchas enfermedades, desarrollando nuevos métodos de siembra y cosecha para intentar abolir el hambre, inventando dispositivos que mejoren el estilo de vida en general de las personas y muchas otras ideas que han puesto a la raza humana en la cúspide de los seres vivos. Sin embargo, estoy seguro de que no hemos llegado al límite y ahora me encuentro aquí aportando mi granito de arena para la ciencia y espero que este proyecto solo sea una extensión de lo que podría ser algo grande en el futuro.

Renato Andrés Dueñas Miranda

Dedico este Artículo Académico a mis padres y hermano, Manuel Torres, Elsa Gavilanes y Hamilton Torres, también quiero agradecer a una persona muy importante en mi vida que es la Sra. Maryuri Burgos, por apoyarme en todo este tiempo de mi vida universitaria y profesional; con mucho cariño, trabajo y esfuerzo lograron convertirme en el ser humano que tanto anhela una familia.

Jefferson Andrés Torres Gavilanes

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios ante todo, porque soy una persona creyente, que más allá de ser haber sido inculcado por sus padres. Tengo fe plena de su existencia de distintas maneras, como energía, como espíritu, o como padre, para mí él ha estado a mi lado en todo momento.

Luego agradezco a mis padres que han sido parte de mi desarrollo y el pilar que me ha convertido en hombre responsable, ingenioso y único. Me han dado el amor y la fuerza para salir adelante ante cualquier adversidad y ha no rendirme ante nada.

Agradezco a mi esposa, que desde que se convirtió en mi compañera de vida, me ha enseñado más sobre lo que significa la familia, una palabra sencilla, pero que abarca un conjunto de amor incondicional hacia los que se convierten en parte de ella.

Agradezco a nuestro tutor PhD. Bremnen Veliz que estuvo apoyandonos en todo momento y al grupo de investigacion Nanotech bajo el proyecto MICNA.

Renato Andrés Dueñas Miranda

Ante todo, le agradezco a Dios, por darme salud e inteligencia para poder cumplir con mis metas propuestas y por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi vida Universitaria y profesional, para seguir adelante y no rendirme jamás.

Agradezco a mis padres, por darme el apoyo necesario en todo momento y haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación, que me ayudó a sobresalir y cumplir con todas mis metas.

Agradezco a mi compañero de tesis y mi gran amigo Renato Dueñas, por ayudarme en el transcurso de mi carrera Universitaria y tener buen trabajo en equipo para conseguir este Artículo Académico con total éxito. Agradezco a los profesores de la Universidad Politécnica Salesiana, en especial a nuestro tutor el Ing. Bremnen Veliz, que con su ayuda y su correcto asesoramiento pudimos lograr la finalización de este Artículo Académico con satisfacción.

Jefferson Andrés Torres Gavilanes

RESUMEN

Actualmente la necesidad de optimizar el tamaño, la eficiencia energética, e inclusive el diseño de los distintos componentes electrónicos son una tarea permanente de los ingenieros para las distintas aplicaciones en circuitos electrónicos que ahora son parte del mundo que nos rodea. Entre estos componentes, se encuentra el capacitor, que es un dispositivo capaz de almacenar energía eléctrica, y en específico el capacitor interdigital coplanario, constituido por electrodos positivos y negativos distribuidos en forma de peine en un mismo plano sobre un sustrato dieléctrico, es un sensor útil para medir distancias, detectar objetos, censar humedad, temperatura, etc.

En este trabajo se realizó la simulación de varios diseños de electrodos interdigitales (IDE) variando el ancho de los electrodos (w) y el espesor del sustrato dieléctrico (t) para una distancia entre electrodos (d) de $100\mu\text{m}$ y un área de trabajo rectangular de 32mm^2 . Los diseños se dividieron en dos configuraciones geométricas, una horizontal de $4\text{mm}\times 8\text{mm}$ y otra vertical de $8\text{mm}\times 4\text{mm}$, es decir dos diferentes longitudes de los electrodos ($3800\mu\text{m}$ y $7800\mu\text{m}$). El material dieléctrico simulado fue óxido de silicio y los electrodos de oro.

Se encontró que ambas configuraciones geométricas tienen capacidades de Maxwell prácticamente iguales entre los 1pF y 4.5pF . También se encontró que en cualquiera de las dos configuraciones, a mayor espesor del dieléctrico y menor anchura de los electrodos, se obtiene mayores valores de capacidad, es decir una mayor densidad de integración. Finalmente los resultados se aproximan a la fórmula de capacidad total de Alley que, al disminuir el ancho de los electrodos, aumenta el error respecto a la capacidad de Maxwell simulada.

PALABRAS CLAVE: sensor interdigital, electrodos, sustrato dieléctrico, capacitancia de Maxwell, campo eléctrico.

ABSTRACT

Currently the need to optimize the size, energy efficiency and the design of different electronic devices are an everlasting task of engineers for the different applications in electronic circuits that are now part of our lives. Among these components, the capacitor, which is a device capable of storing electrical energy, and specifically the coplanar interdigital capacitor, that consists in positive and negative electrodes distributed in the form of a comb in the same plane on a dielectric substrate is a useful sensor for measuring distances, detecting objects and sensing humidity, temperature, etc.

In this work, the simulation of several designs of interdigital electrodes (IDE) was carried out, varying the width of the electrodes (w) and the thickness of the dielectric substrate (t) for a distance between electrodes (d) of 100 μm and a rectangular work area of 32 mm^2 . The designs were divided into two geometric configurations, a horizontal shape of 4 $\text{mm} \times 8\text{mm}$ and a vertical shape of 8 $\text{mm} \times 4\text{mm}$, that is, two different lengths of the electrodes (3800 μm and 7800 μm). The simulated dielectric material was silicon oxide and gold electrodes.

It was found that both geometric configurations have practically equal Maxwell capacitances between 1 pF and 4.5 pF . It was observed that in either of the two configurations, while thicker dielectric and smaller width of the electrodes, higher capacity values are obtained, that is a higher integration density. Finally, the results are close to Alley's total capacitance equation which, by decreasing the width of the electrodes, increases the error with respect to the simulated Maxwell capacitance.

KEY WORDS: interdigital sensor, electrodes, dielectric substrate, Maxwell capacitance, electric field

INDICE DE CONTENIDO

Contenido

INTRODUCCION	9
REVISION DE LA LITERATURA	9
METODOLOGÍA	11
INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	14
CONCLUSION	23
BIBLIOGRAFÍA.....	24

INTRODUCCION

REVISION DE LA LITERATURA

Actualmente la necesidad de optimizar el tamaño, la eficiencia energética, e inclusive el diseño de los distintos componentes electrónicos son una tarea permanente que tienen los científicos para corregir, actualizar o mejorar los circuitos electrónicos que ahora son parte del mundo que nos rodea. Entre estos componentes, se encuentra el capacitor que, por medio de sus propiedades físicas, ha permitido almacenar energía a través de un material dieléctrico entre sus placas y entre otras aplicaciones también ha contribuido con la corrección del rizado a la salida de cualquier circuito AC/DC.

Sin embargo, la relación que puede haber entre el tamaño y su capacidad para almacenar energía puede ser un problema porque ambos son directamente proporcionales.

La forma más simple de un capacitor está formada por dos placas metálicas paralelas de sección A , denominadas armaduras, separadas una distancia d en las que existe un dieléctrico o aislante de permitividad ϵ , tal como se muestra en la Figura 1. [1]

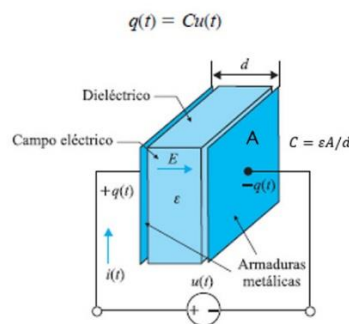


Figura 1 Capacitor de placas paralelas. [1]

La constante de proporcionalidad C es la capacidad del condensador y se mide en faradios (F). El valor de capacidad de un capacitor depende de sus dimensiones y de la permitividad del dieléctrico incluido entre las placas y su expresión para un condensador plano es: [1]

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (1)$$

Donde ϵ_0 es la permitividad del vacío, ϵ_r es la permitividad relativa del material dieléctrico que conecta a las dos placas, A es el área de la superficie de los electrodos y d es la distancia entre los electrodos. [2]

Otras geometrías comunes de electrodos, tales como los arreglos en forma paralela, dipolos e interdigitales generan campos eléctricos diversos, que al atravesar materiales producen la polarización de sus moléculas, y por ende se puede medir sus propiedades dieléctricas. De todas las geometrías, los electrodos interdigitales (IDEs) han demostrado ser de fácil fabricación, bajo de costo y ser efectivos en una extensa variedad de aplicaciones.

Con respecto al capacitor interdigital coplanario, sus placas ya se encuentran compartiendo el mismo plano, esto permitirá el mismo modelo teórico, pero su campo eléctrico generado no

estará encerrado dentro del material dieléctrico, por lo contrario con placas paralelas en el mismo plano, ese campo eléctrico tiene opción de moverse hacia arriba de las placas.

Por ejemplo, los IDEs¹ incluyen su uso en elementos agrupados para circuitos integrados de microondas, dispositivos de ondas ópticas y acústicas de superficie, dispositivos microondas controlados ópticamente, dispositivos sintonizables y transductores acústico-electrónicos de película delgada y estudios dieléctricos sobre finas películas. [3]

Comercialmente se pueden encontrar electrodos interdigitales con metales como oro, plata, platino y sus sustratos son materiales aislantes como FR4², alúmina³, vidrio, silicio, etc. [2]. Por otro lado, también se pueden considerar geometrías cuadradas y rectangulares horizontales o verticales, pero no hay una afirmación clara de cual configuración geométrica es más eficiente para aportar más capacidad por unidad de área. Entonces a través de su análisis en el diseño, el objetivo es conocer cuál es el más eficiente en términos de medir el ratio capacitancia/ancho de placas.

El estudio planteado en este trabajo, es sobre la simulación de los IDEs de diferentes diseños geométricos, que permitan conocer lo que sucede con el campo eléctrico y determinar la mayor capacidad para optimizar dimensiones, además de facilitar el diseño de los mismos. Así, a través de la manipulación de parámetros importantes, tales como el ancho de los electrodos, el espesor del sustrato, y el tipo de material utilizado en las placas metálicas, manteniendo otras variables constantes como la distancia entre los electrodos y el área de trabajo, se analizan los resultados para encontrar la estructura con mayor capacidad y por lo tanto mayor densidad de integración.

A continuación, se presenta un ejemplo de aplicación de un sensor interdigital que se muestra en la Figura 2. Se trata de biosensor capacitivo útil para detectar o medir proteínas específicas o sustancias biomoleculares. Con el propósito de proveer un área más grande de un sensor, se opta por un patrón interdigital en un mismo plano. [4]

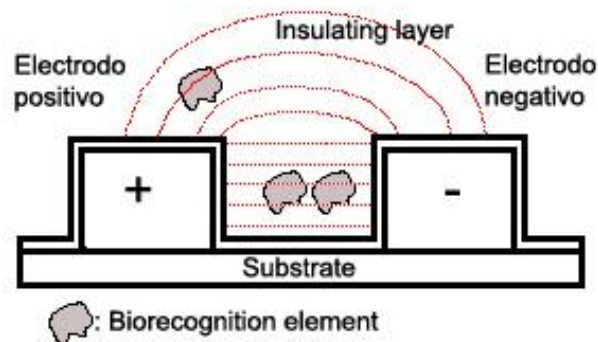


Figura 2 Afinidad del biosensor de electrodos interdigitales. [4]

¹ Conocidos como IDEs, estas son las siglas de los Electrodos Interdigitales en inglés, que se pueden definir como "Interdigitated Electrodes". [4]

² FR4 es una norma definida por la NEMA (National Electrical Manufacturers Association) para un compuesto de resina epoxídica reforzada de fibra de vidrio. [12]

³ La alúmina es el óxido de aluminio y está fuertemente influenciado por su pureza y proceso de fabricación. Su símbolo es el Al₂O₃. [13]

El principio de detección de los sensores capacitivos interdigitales está basado en el cambio de la constante dieléctrica. Ha sido comprobado por A. Quershi y C. Tsouti, que el cambio de la capacitancia ocurre cuando las propiedades del material dieléctrico entre las placas cambian también. De esta manera se puede definir la capacitancia del sensor por medio de la ecuación. [4]

$$C_{sensor} = \eta \varepsilon \frac{lt}{d} \quad (2)$$

Donde η es el número de dedos, ε es la permitividad de la película de revestimiento sensible, l es la longitud de los electrodos interdigitales, t es el espesor de los electrodos interdigitales, y d es la distancia entre los electrodos. Sin embargo, este cálculo de capacitancia no puede ser aplicado cuando los electrodos son usados en nano-escalas. [4]. Cabe destacar que esta ecuación no serviría en nuestro caso porque se basa en un ancho específico del electrodo y omite detalles como el ratio de metalización.

METODOLOGÍA

El diseño y simulación fueron realizados con el software COMSOL Multiphysics, Este software tiene como objetivo el análisis de elementos finitos que permiten conocer las propiedades físicas de un material y su reacción con el medio que lo rodea.

Las geometrías propuestas son dos configuraciones con dimensiones diferentes. Por un lado, se tomó como área de trabajo un rectángulo vertical de 8mmx4mm, y por el otro un rectángulo horizontal de 4mmx8mm siendo altura por base sus especificaciones. Se pueden observar ambas configuraciones en la Figura 3.

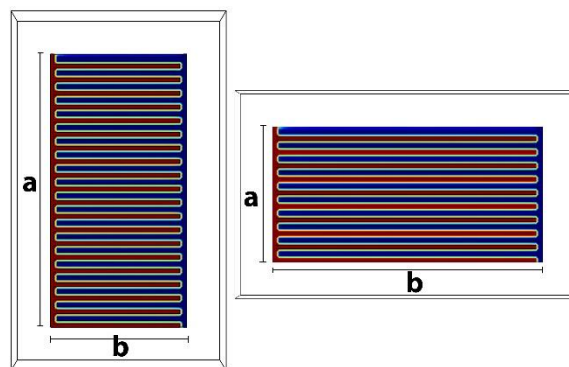


Figura 3 Primera configuración geométrica rectangular, donde "a" representa la altura y "b" la base.

Con el propósito de determinar el efecto del potencial eléctrico y densidad de las líneas de campo eléctrico, utilizamos oro y vidrio como materiales para los electrodos y sustrato respectivamente para las simulaciones. El ancho de los electrodos es variado en cada simulación, mientras que la longitud se mantiene a 7800 micrómetros para la geometría vertical y 3800 micrómetros para la geometría horizontal. En todas las simulaciones, la distancia entre los electrodos se establece en 100 micrómetros. Las configuraciones son las observadas en la Tabla 1 y Tabla 2, donde siempre se referirá a la altura por la base en ese respectivo orden.

Tabla 1 Parámetros de trabajo para el sensor rectangular de 8mmx4mm propuestos por el autor.

Geometría 8mmx4mm (vertical)		
Parámetro	Valores	Unidad
Longitud del electrodo (l)	7800	μm
Ancho del electrodo (w)	100, 200, 400, 600, 800	μm
Distancia entre electrodos (d)	100	μm

Tabla 2 Parámetros de trabajo para el sensor rectangular de 4mmx8mm propuestos por el autor.

Geometría 4mmx8mm (horizontal)		
Parámetro	Valores	Unidad
Longitud del electrodo (l)	3800	μm
Ancho del electrodo (w)	100, 200, 400, 600, 800	μm
Distancia entre electrodos (d)	100	μm

Se puede ver en la figura 4 cuál es la definición de la longitud (l) y ancho (w) de los electrodos y su distancia (d) entre ellos.

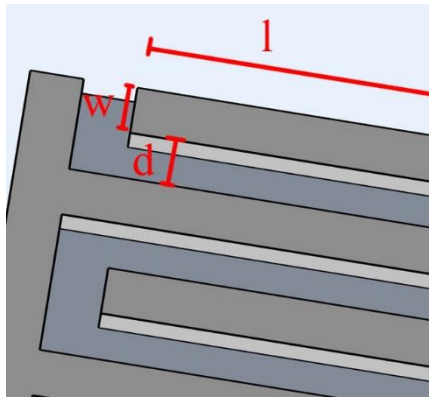


Figura 4 Ampliación de la configuración geométrica para observar la longitud (l), el ancho (w) de los electrodos, y la distancia (d) entre ellos. Elaborado por el autor.

Como se observa en la Tabla 3, se muestran las dimensiones propuestas para el diseño de los electrodos con las configuraciones rectangulares vertical y horizontal. Como Altura y base se refiere a los lados de la geometría de todo el dispositivo interdigital, se ha elaborado 10 estilos de geometrías, 5 con formas verticales (8mmx4mm) y 5 con formas horizontales (4mmx8mm), es decir dos diferentes longitudes de los electrodos. Adicional a esto, tenemos los ratios de metalización η y periodicidad de electrodos λ para cada parámetro, estos se definirán con detalle más adelante.

Tabla 3 Parámetros propuestos para la geometría rectangular de sensores interdigitales.

N	Ancho de electrodo (μm)	Geometría (mm)		Numero de electrodos (n)		Ratio de metalización	Periodicidad electrodos
		Altura	Base	Positivos	Negativos	$\eta=W/W+D$	$\lambda=2(W+D)$
1	100um	8	4	20	20	0.50	400um
2	200um	8	4	14	13	0.67	600um
3	400um	8	4	8	8	0.80	1000um
4	600um	8	4	6	5.5	0.86	1400um
5	800um	8	4	5	4	0.89	1800um
6	100um	4	8	10	10	0.50	400um
7	200um	4	8	7	6.5	0.67	600um
8	400um	4	8	4	4	0.80	1000um
9	600um	4	8	3	2.83	0.86	1400um
10	800um	4	8	2.5	2	0.89	1800um

Además, cinco diferentes espesores de la lámina del sustrato que se observa en la Tabla 4. Este sustrato tiene una permitividad relativa de $\epsilon_r=4.2$ mucho mayor a la del aire que es 1.

Tabla 4 Grupo de muestras para diferentes espesores del sustrato.

Muestra No.	Espesor del sustrato
1	50um
2	100um
3	150um
4	200um
5	250um

INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Se realiza el estudio de electrostática del diseño que se puso a prueba en estas dimensiones. Las ecuaciones que se toman en consideración para realizar el procesamiento de datos, se muestran a continuación.

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v \quad (3)$$

$$-\nabla V = \mathbf{E} \quad (4)$$

Se ejecutó una evaluación por medio de la herramienta *parametric sweep*⁴ que permite un barrido de todos los parámetros ingresados para resolver posibles variaciones del sistema. En el desarrollo de productos, a menudo es necesario resolver distintas variaciones de un modelo para encontrar las propiedades óptimas de su diseño. [5]

En la etapa de evaluación de los datos, se realiza la agrupación de distintos tipos de datasets⁵. Luego de tener los grupos con los que se va a trabajar, el tipo de estudio es electroestático, el cual nos permitirá determinar las capacitancias interdigitales de cada configuración. En la figura 5 y 6 se presentan 2 grupos de datos que permitirán conocer el potencial eléctrico, el campo eléctrico y la capacitancia total en todo el espacio de trabajo, tanto como en el plano central del sensor y analizando su respuesta a lo largo de este plano desde abajo (tocando los electrodos) hacia arriba (tocando el borde superior del espacio de trabajo).

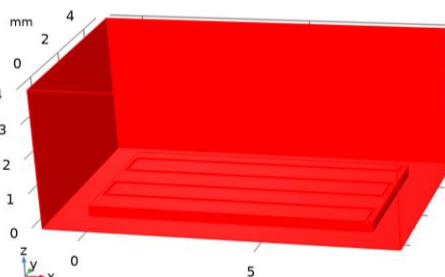


Figura 5 Conjunto de datos 1: Estudio 1/ 4mmx8mm. Se selecciona todo el volumen de la muestra para el análisis de todos los elementos que componen el sensor interdigital.

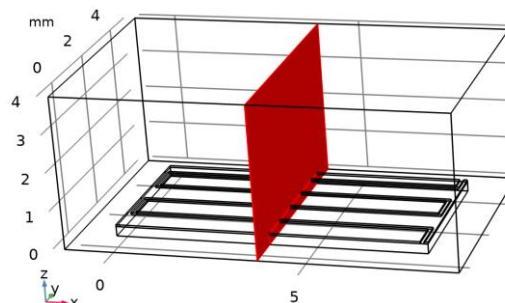


Figura 6 Conjunto de datos 2: Corte plano 1 realizado en el centro del sensor de 4mmx8mm en el eje YZ con electrodos de 800um de ancho, que nos permite evaluar los datos en esa área. Toda la sección de color rojo son los datos a evaluar.

⁴ Parametric Sweep quiere decir barrido paramétrico en español

⁵ Los datasets son una colección de datos relacionados entre sí que son analizados como un solo grupo.

Continuando con el barrido paramétrico, este se ejecutó para evaluar los resultados con respecto al cambio de dos variables importantes que en este caso son el ancho de los electrodos (w) y el espesor de la capa del sustrato de vidrio (t). El espacio (d) entre los electrodos será constante.

En la figura 7 se muestran los resultados de potencial eléctrico en 2D en las 10 configuraciones a un solo espesor del sustrato, donde se puede observar que los dedos aumentan su tamaño tanto en la configuración 8mmx4mm como en la 4mmx8mm. Considerando que son 5 espesores, el barrido paramétrico nos permite realizar la evaluación de datos con todas las combinaciones posibles, nos permite obtener resultados de 50 combinaciones para determinar que configuración es la más eficiente. En la Figura 8 se muestra un esquema del espesor del sustrato.

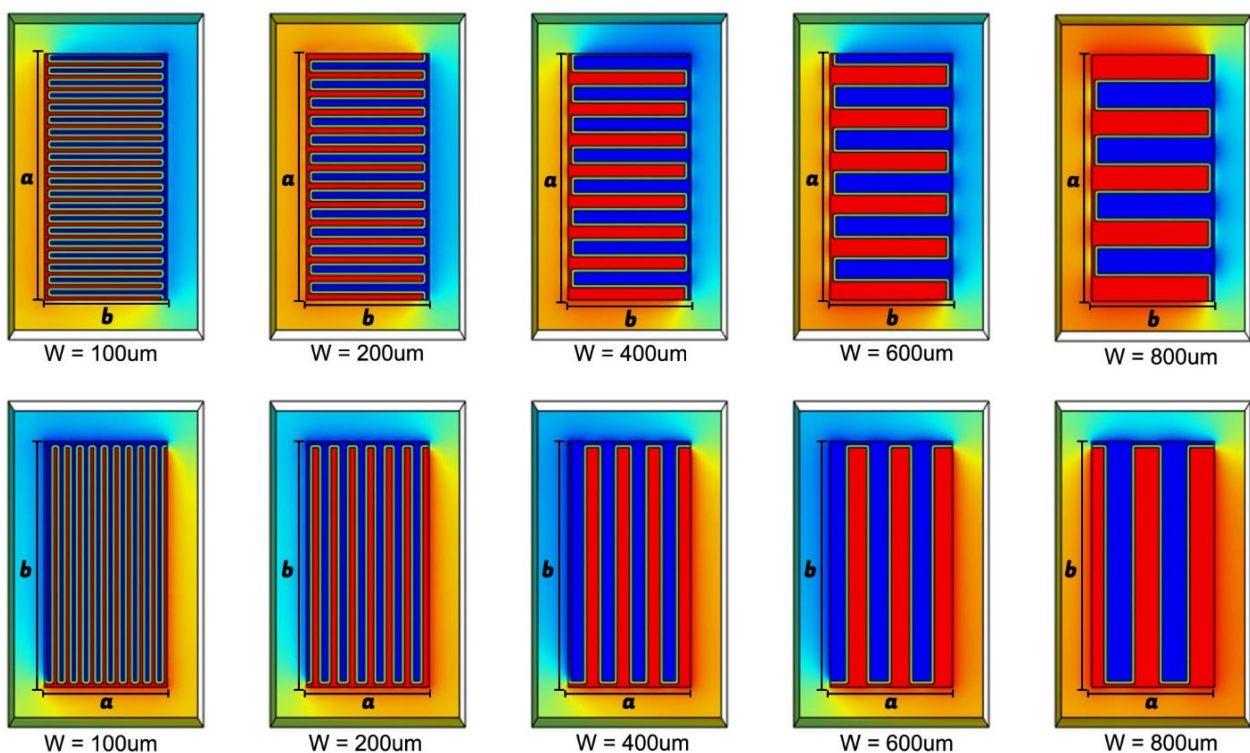


Figura 7 Diseños Geométricos de las 10 configuraciones propuestas mostradas en la Tabla 3, que permiten conocer los diferentes diseños para el análisis.

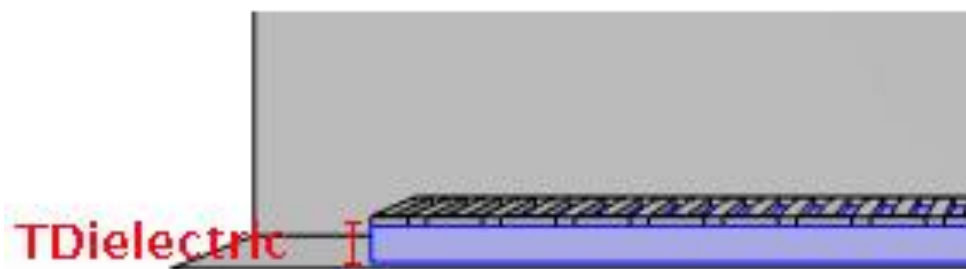


Figura 8 Espesor de 200 μm del sustrato de vidrio para referencia.

Al realizar la evaluación electrostática, se calcula la Capacitancia de Maxwell, por medio de la herramienta Volume maximum de Comsol, que nos permite generar una tabla de resultados con todos los datos del barrido paramétrico. Se puede observar en la tabla 5 que cada configuración de la geometría 4mmx8mm generó 25 resultados con una clara tendencia que será analizada más adelante. Como columnas tenemos el ancho de los electrodos, el espesor del sustrato dieléctrico, capacidad de Maxwell calculada por Comsol y una constante que relaciona el espesor del dieléctrico (t) para la periodicidad del electrodo (λ). La constante r es necesaria para encontrar K(k).

Tabla 5 Capacitancia de Maxwell en la geometría 4mmx8mm (horizontal)

Capacitancia de Maxwell para electrodos interdigitales 4mmx8mm			
Ancho de electrodos (um)	TDielectric (um)	Maxwell capacitance (F)	Constante R $r=t/\lambda$
100.00	50.000	3.5101E-12	0.125
100.00	100.00	4.3736E-12	0.250
100.00	150.00	4.6257E-12	0.375
100.00	200.00	4.5842E-12	0.500
100.00	250.00	4.6030E-12	0.625
200.00	50.000	2.5766E-12	0.083
200.00	100.00	3.3411E-12	0.167
200.00	150.00	3.6852E-12	0.250
200.00	200.00	3.7398E-12	0.333
200.00	250.00	3.7841E-12	0.417
400.00	50.000	1.5293E-12	0.050
400.00	100.00	1.9805E-12	0.100
400.00	150.00	2.2393E-12	0.150
400.00	200.00	2.3571E-12	0.200
400.00	250.00	2.4468E-12	0.250
600.00	50.000	1.1637E-12	0.036
600.00	100.00	1.4977E-12	0.071
600.00	150.00	1.6928E-12	0.107
600.00	200.00	1.7990E-12	0.143
600.00	250.00	1.8873E-12	0.179
800.00	50.000	9.7591E-13	0.028
800.00	100.00	1.2460E-12	0.056
800.00	150.00	1.4037E-12	0.083
800.00	200.00	1.4965E-12	0.111
800.00	250.00	1.5742E-12	0.139

Se puede verificar que mientras el ancho de los electrodos sea más angosto y el espesor del dieléctrico sea más grueso, la capacitancia de Maxwell va a incrementar, dando un visión más clara sobre cuál es el comportamiento del dispositivo si manipulamos los dos variables dimensionales. Sin embargo, es posible notar que estos cambios son parte de dos constantes utilizadas en otros artículos científicos llamadas ratio de metalización η que determina la relación entre el ancho y la distancia entre los dedos, y periodicidad de electrodos λ (que determina la cantidad de electrodos positivo y negativo sumado a la distancia entre ellos que se repiten en el área del sensor $2(w + d)$).

De igual manera en la tabla 6, se puede apreciar la capacitancia de las siguientes 25 muestras más, con la configuración del capacitor interdigital en posición vertical. Para cada ancho de los electrodos la capacidad es mayor cuando mayor es el espesor del dieléctrico. También se puede observar que la capacidad es mayor cuando el ancho de electrodos es menor, en nuestro caso para 100 μm .

Tabla 6 Capacitancia de Maxwell en la geometría 8mmx4mm (vertical)

Capacitancia de Maxwell para electrodos interdigitales 8mmx4mm			
Ancho de electrodos (μm)	TDielectric (μm)	Maxwell capacitance (F)	Constante R $r=h/\lambda$
100.00	50.000	3.5103E-12	0.125
100.00	100.00	4.3641E-12	0.250
100.00	150.00	4.5638E-12	0.375
100.00	200.00	4.5697E-12	0.500
100.00	250.00	4.5809E-12	0.625
200.00	50.000	2.5473E-12	0.083
200.00	100.00	3.2988E-12	0.167
200.00	150.00	3.5958E-12	0.250
200.00	200.00	3.6930E-12	0.333
200.00	250.00	3.7366E-12	0.417
400.00	50.000	1.6440E-12	0.050
400.00	100.00	2.1302E-12	0.100
400.00	150.00	2.3830E-12	0.150
400.00	200.00	2.5220E-12	0.200
400.00	250.00	2.6149E-12	0.250
600.00	50.000	1.3043E-12	0.036
600.00	100.00	1.6789E-12	0.071
600.00	150.00	1.8775E-12	0.107
600.00	200.00	2.0048E-12	0.143
600.00	250.00	2.1022E-12	0.179
800.00	50.000	1.0341E-12	0.028
800.00	100.00	1.3242E-12	0.056
800.00	150.00	1.4796E-12	0.083
800.00	200.00	1.5773E-12	0.111
800.00	250.00	1.6576E-12	0.139

En las Figuras 9 y 10 se muestra una dependencia de las dos variables, espesor del dieléctrico y el ancho de los electrodos en forma gráfica. La capacidad es mayor cuando más pequeño es el ancho del electrodo y cuando mayor es el espesor del dieléctrico. La capacidad de Maxwell que en este caso llega a poco más de 4.5pF es representada en la gráfica por los diferentes colores, permitiendo conocer los valores más elevados en color rojo y los más bajos en color azul con valores de hasta 1pF aproximadamente. De esta manera se contrasta el surfeo de colores que permite entender cómo se comporta la disposición del ancho de electrodos en relación con el espesor del dieléctrico en el rango establecido.

Se puede observar que la Figura 9 que es de configuración horizontal tiene un surfeo bastante parecido al de la Figura 10 que es de configuración vertical.

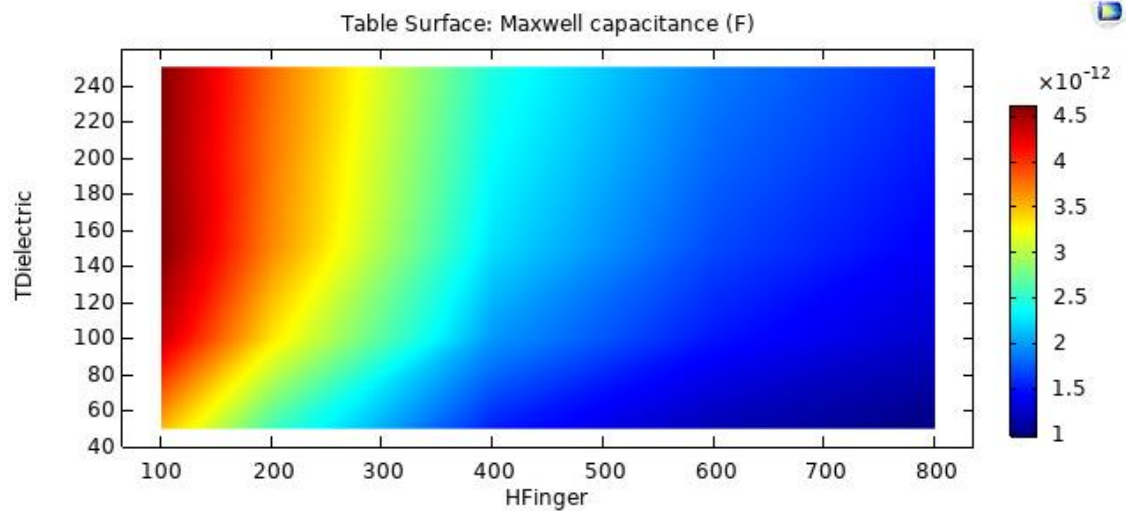


Figura 9 Tabla de surfeco de los resultados de la capacitancia de Maxwell, configuración 4mmx8mm.

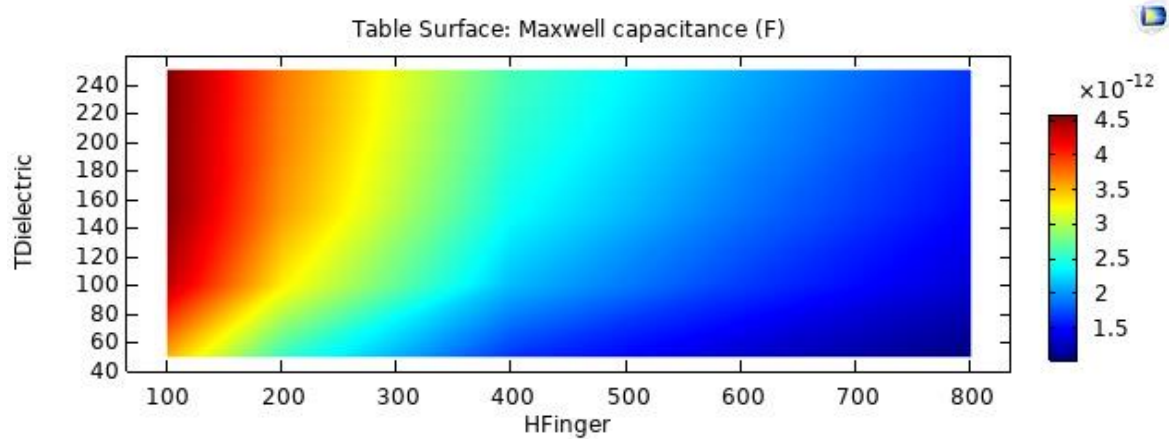


Figura 10 Tabla de surfeco de los resultados de la capacitancia de Maxwell, configuración 8mmx4mm.

Se puede realizar una comparación de resultados basados en la ecuación 5 propuesta por Alley desde 1970 y que ha sido analizada y reestructurada a través de los años por los diferentes científicos y estudiosos como en la actualidad se encuentra en el libro Sensores Interdigitales, su progreso durante las dos últimas décadas. [6]

$$C_T = (N - 3) \frac{C_I}{2} + 2 \frac{C_I C_E}{C_I + C_E} \quad (5)$$

Donde C_T representa la capacitancia total del sensor, N es la cantidad de dedos interdigitales presentes en el sensor (la suma de todos los dedos tanto positivos como negativos). C_I es la capacitancia entre los dedos al interior del sensor, mientras que C_E es la capacitancia en los bordes del sensor. Además de esto, es necesario poder determinar cada una de estas capacitancias para poder realizar la operación anterior, para se tiene las siguientes ecuaciones 6 y 7.

$$C_E = \varepsilon_0 \varepsilon_r L \frac{K(k_E)}{K(k'_E)} \quad (6)$$

$$C_I = \varepsilon_0 \varepsilon_r L \frac{K(k_I)}{K(k'_I)} \quad (7)$$

Donde $K(k)$ es la integral elíptica completa de primera clase con el modulo k , y su módulo complementario k' . La permitividad en el vacío ε_0 y la permitividad relativa ε_r del sustrato en este caso. [3]

La tabla 7 presenta los resultados obtenido por medio de la ecuación 5 y se puede observar que hay errores del 7.19% al 24.41%. Esto se debe a que la ecuación propuesta de acuerdo a la fuente tiene que ser modificada con respecto a su uso en particular, por ejemplo de acuerdo con Igreja, esta ecuación calcula la capacitancia total teniendo en cuenta una capa fina sensitiva en el tope, un sustrato grueso en la base, y el aire como un componente dieléctrico infinito, sin embargo cita que si puede ser fácilmente modificable. Otro detalle importante es que las ecuaciones anteriores son para casos con sustratos gruesos mucho más grandes que $\lambda/2$. Por ejemplo para el caso de $w=400\mu\text{m}$, $d=100\mu\text{m}$, $\lambda=1000\mu\text{m}$, esto quiere decir que el sustrato debería ser mayor que $500\mu\text{m}$, pero estamos usando sustrato máximo de $250\mu\text{m}$. De todas maneras, esta ecuación si nos permite obtener valores cercanos.

Tabla 7 Margen de error entre valores teóricos y simulados.

Ancho del electrodo	Altura x Base	No. de electrodos	Valores formula teórica	Valores simulados en Comsol	Error valores teórico y simulado
100	8x4	40	3.4541E-12	4.5697E-12	24.41%
200	8x4	27	3.0433E-12	3.7366E-12	18.55%
400	8x4	16	2.2805E-12	2.6149E-12	12.79%
600	8x4	11.5	1.8372E-12	2.1022E-12	12.61%
800	8x4	9	1.5384E-12	1.6576E-12	7.19%
100	4x8	20	3.4988E-12	4.5842E-12	23.68%
200	4x8	13.5	3.0549E-12	3.7841E-12	19.27%
400	4x8	8	2.2422E-12	2.4468E-12	8.36%
600	4x8	5.83	1.7952E-12	1.8873E-12	4.88%
800	4x8	4.5	1.4456E-12	1.5742E-12	8.17%

La Figura 11 muestra la Grafica 3D geométrica, en la cual además de poder apreciar las dimensiones de cada configuración, también se puede observar el potencial eléctrico entre los electrodos interdigitales, uno conectado a un voltaje de 5V (electrodo de color rojo) y el otro conectado a tierra (electrodo de color azul).

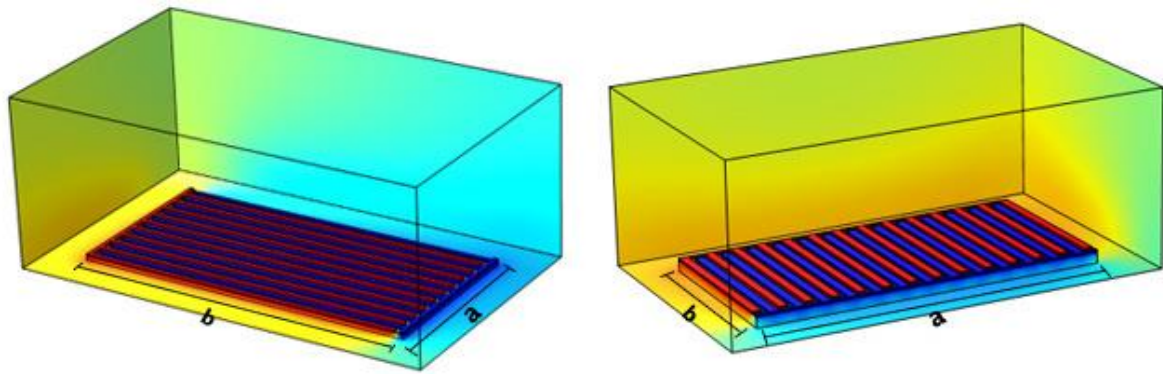


Figura 11 Gráfica 3D de las configuraciones: 4mmx8mm (izquierda) con electrodos interdigitales de un ancho de 100µm con un dieléctrico de 50µm de espesor; 8mmx4mm (derecha) con electrodos interdigitales de ancho de 200µm con un dieléctrico de 200µm de espesor. El voltaje de 5V se encuentra en electrodo de color rojo y la terminal de tierra se encuentra en el electrodo azul. La capacidad de Maxwell para la primera configuración es 3.51pF y la segunda es 3.69pF.

En la Figura 12 se observa la Gráfica 3D de las líneas de campo eléctrico, las cuales permiten observar el comportamiento de las componentes de xyz del campo eléctrico a través de vectores de línea que salen de los electrodos positivos (rojos) a negativos (azul).

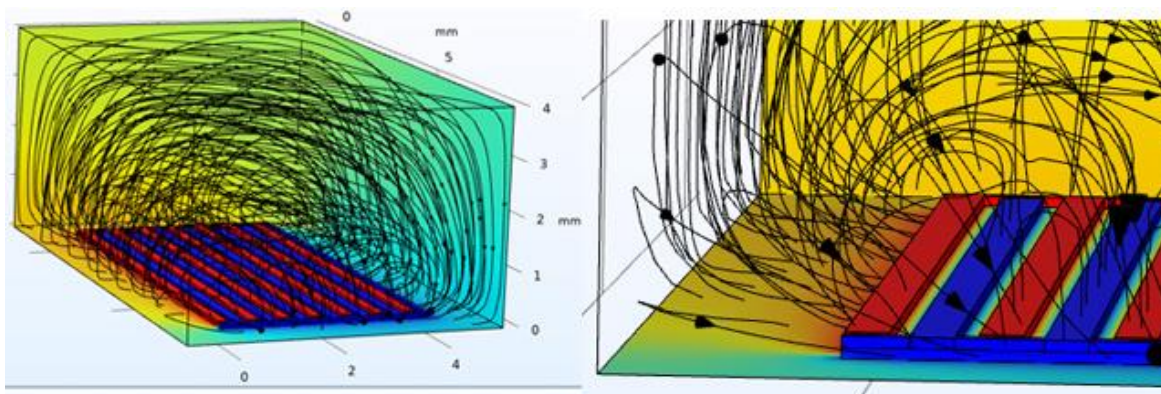


Figura 12 Gráfica 3D del campo eléctrico de la configuración 4mmx8mm. Ampliación de la imagen donde se observan las líneas de campo eléctrico se dirigen de izquierda a derecha, es decir que salen del terminal positivo hacia el terminal de tierra.

En la Figura 13 se observa la Gráfica 2D de las líneas de campo eléctrico, que por medio del grupo de datos no. 2 (plano pintado de color rojo), nos permite conocer con más detalle los vectores de los componentes del campo eléctrico a través del corte plano que se localiza en el centro de los electrodos. Se pueden observar de forma más clara la posición de las líneas, cuál es su trayectoria y cual configuración genera un campo más simétrico.

Por ejemplo, tomando como referencia la configuración 4mmx8mm, podemos darnos cuenta de que debido a la cantidad par (13.5 redondeado) de 1 electrodos con un espesor de 200µm que se encuentra en esa configuración, la distribución de los electrodos es: uno positivo y uno negativo en los bordes del sensor. Esto genera líneas de campo eléctrico menos simétrico. Por otro lado, tenemos la configuración de 8mmx4mm con una cantidad impar de 27 electrodos con un espesor de 200µm y cuya distribución de electrodos es: dos positivos en los bordes del

sensor (sombra roja). Esto genera líneas de campo eléctrico bastante simétrico respecto al electrodo central que es negativo. En la Figura 14, se puede observar que las líneas de campo eléctricos van de los electrodos positivos a los negativos como lo indican las flechas.

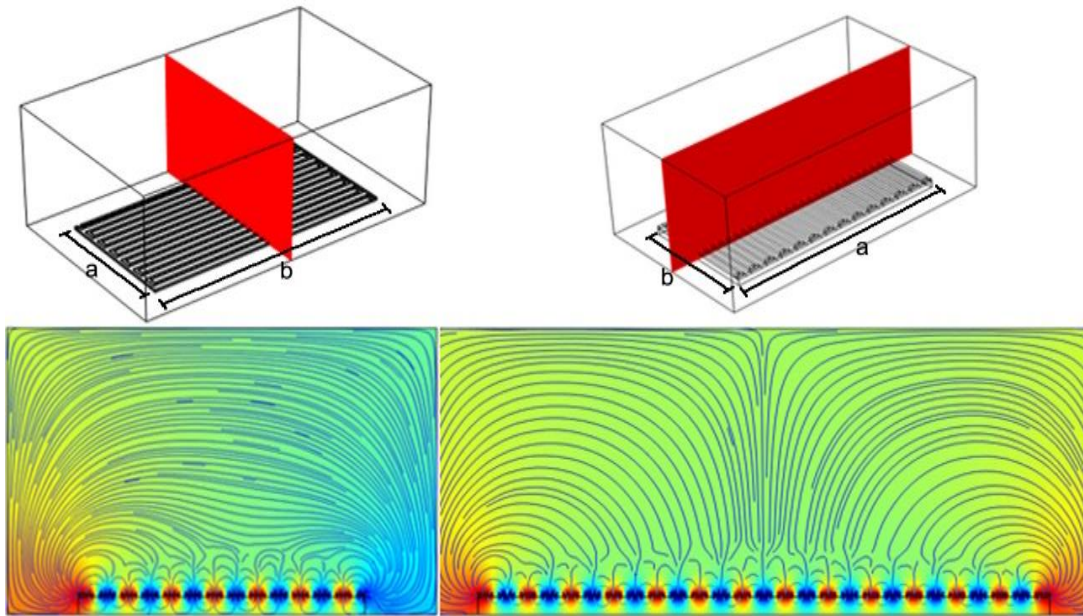


Figura 13 Gráfica 2D del campo eléctrico de las configuraciones 4mmx8mm con $N = 13.5$, $W = 200\mu\text{m}$ y 8mmx4mm con $N = 27$, $W = 200\mu\text{m}$.

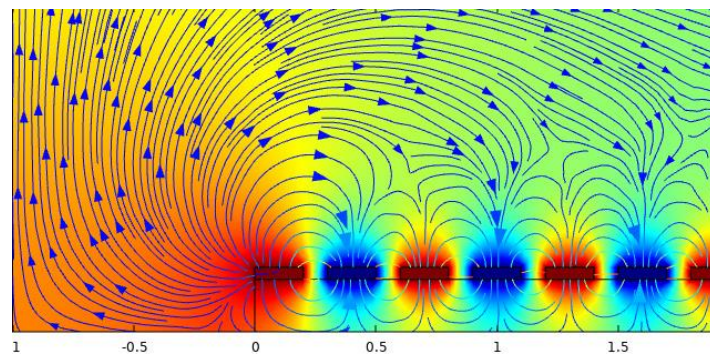


Figura 14 Ampliación de las líneas de campo eléctrico con el grupo de datos 2, la configuración es de 4x8mm con electrodos interdigitales de 200um y el dieléctrico de 250um de espesor.

La figura 15 y 16 muestran los resultados de la capacitancia de Maxwell de cada configuración y combinación con las 2 variables (ancho de electrodos w y espesor dieléctrico t) que se han establecido como parte del barrido paramétrico.

Si se considera las 5 configuraciones de anchura de electrodos (50, 100, 200, 400, 600) y los 5 espesores del dieléctrico (50, 100, 150, 200, 250), el total de combinaciones llegaría a 25. Sin embargo, como son dos tipos de configuraciones (4x8 y 8x4), las combinaciones se multiplican al doble en un total de 50 combinaciones diferentes.

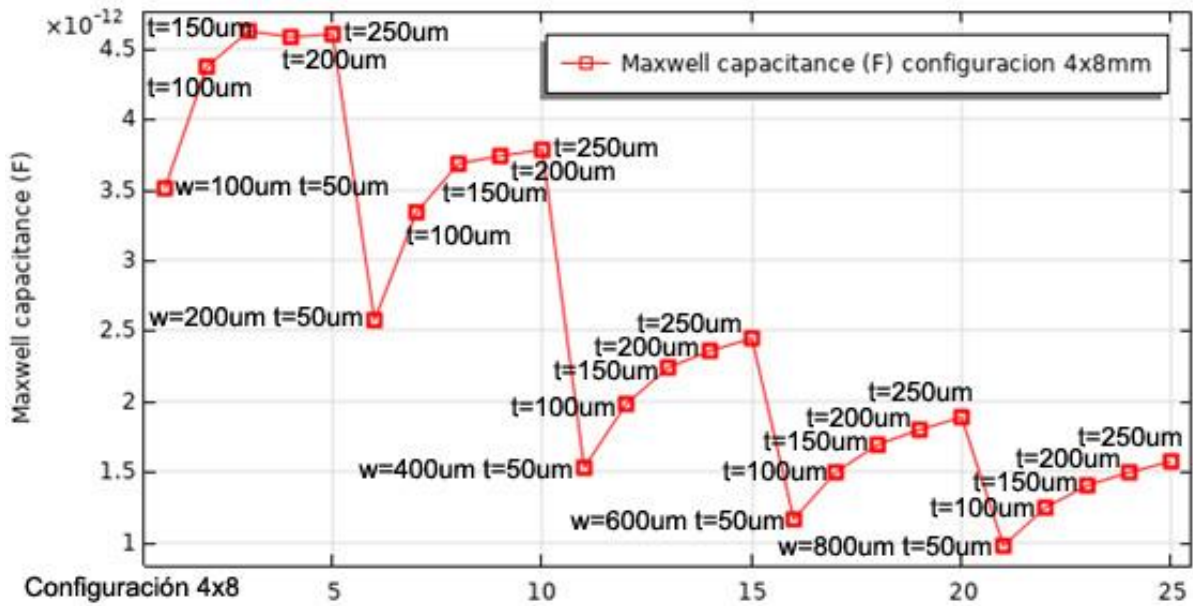


Figura 15 Tabla gráfica que muestra los 25 resultados, de las combinaciones de las variables ancho de electrodos w y espesor del dieléctrico. Configuración 4x8mm. En el dominio se tienen las muestras iniciando desde el ancho de 100um con un espesor dieléctrico de 50um hasta llegar a la muestra no. 25 que es de un ancho de 800um con un espesor dieléctrico de 250um.

Se puede comprobar que la función generada en forma de sierra es el resultado de la relación ancho de electrodos w y espesor del dieléctrico t que se encuentra en la tabla 5 y 6. Sin embargo esta grafica permite visualizar mejor la tendencia de capacitancia a lo largo del cambio de sus parámetros.

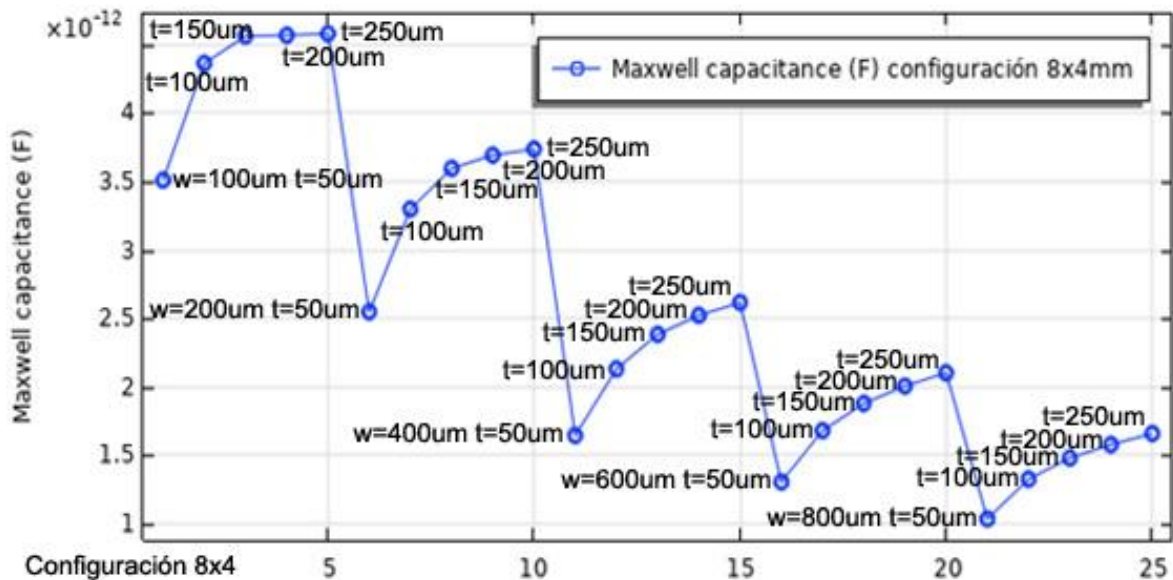


Figura 16 Tabla gráfica que muestra los 25 resultados, de las combinaciones de las variables ancho de electrodos w y espesor del dieléctrico. Configuración 8x4mm. En el dominio se tienen las muestras iniciando desde el ancho de 100um con un espesor dieléctrico de 50um hasta llegar a la muestra no. 25 que es de un ancho de 800um con un espesor dieléctrico de 250um.

CONCLUSION

Se puede concluir que los parámetros de ancho de electrodos y espesor dieléctrico han afectado el campo eléctrico y la capacidad del sensor, dejando a conocer una dependencia al ancho del electrodo w , distancia entre ellos d , espesor del dieléctrico t y número de electrodos N . Así como se definió una área en particular para hacer las pruebas, se constató que si dejábamos la distancia d constante y se variaba el ancho de los electrodos w , esto indiscutiblemente aumentaría el número de electrodos N en el sensor. Esta cantidad N se vería reflejada en la ecuación (5) que se propuso en los resultados y sabemos que es directamente proporcional a la capacidad.

La configuración ideal entre las 50 presentadas para obtener una mayor capacidad de los electrodos fue la de configuración horizontal de 4mmx8mm, teniendo 20 electrodos entre positivos y negativos, con un ancho de electrodos de 100um y un espesor del sustrato de 250um.

Capacitancia de Maxwell para electrodos interdigitales 4mmx8mm			
Ancho de electrodos (um)	TDielectric (um)	Maxwell capacitance (F)	Numero de electrodos (N)
100.00	250.00	4.6030E-12	20

A pesar de que el área de un electrodo horizontal era mayor debido a su longitud de 7800um, el área total del sensor se igualaba al de la configuración vertical debido al número de electrodos que era mayor debido a la altura del electrodo de 8000um. Esto quiere decir que en ambos casos el área era la misma, sin embargo la capacidad de Maxwell en la configuración vertical con los mismo parámetros fue de 4.58pF siendo menor por centésimas, en conclusión no podemos contribuir que la configuración horizontal sea exclusivamente más eficiente que la vertical.

Recomendamos realizar pruebas adicionales con parámetros de distancias entre electrodos y espesor del sustrato más elevados, para resaltar diferencias más significativas que puedan diferenciar con mayor potencial cuál de las dos configuraciones es mejor. Sin embargo, en nuestras pruebas el capacitor interdigital coplanario horizontal de 32 mm² con 20 electrodos fue el que se llevó la mayor capacidad de Maxwell.

Finalmente se quiere recalcar que mientras mayor sea el espesor del dieléctrico y menor sea el ancho de los electrodos, mayor será la capacidad de Maxwell, sin embargo notamos que la capacitancia se satura luego de seguir incrementando el espesor del dieléctrico con las muestras observadas. Es decir que llega un momento en el que a mayor espesor del dieléctrico, es insignificante el incremento de la capacidad. Caso contrario, lo que ocurre con el ancho de los electrodos con una distancia entre ellos constante es que la capacidad aumenta conforme el ancho disminuye.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. F. Mora, Circuitos eléctricos, Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A., 2012.
- [2] M. Abdul Rahman, S. Mukhopadhyay y P. Yu, «Novel Sensors for Food Inspection: Modelling, Fabrication and Experimentation,» *Springer*, 2014.
- [3] R. Igreja y C. Dias, «Analytical evaluation of the interdigital electrodes capacitance for a multi-layered structure,» *Elsevier*, 2004.
- [4] N. S. Mazlan, M. M. Ramli, M. M. A. B. Abdullah, D. S. C. Halin, S. S. M. Isa, L. F. A. Talip, N. S. Danial y S. A. Z. Murad, «Interdigitated electrodes as impedance and capacitance biosensors,» *American Institute of Physics*, 2017.
- [5] COMSOL INC., «COMSOL,» 01 12 2021. [En línea]. Available: <https://www.comsol.com/>.
- [6] Springer Nature Switzerland AG, «Optimization of Interdigitated Sensor Characteristics,» de *Smart Sensors, Measurement and Instrumentation*, Cham, Springer Nature Switzerland AG, 2021, pp. 91-122.
- [7] C. Shen, C.-P. Wang, M. Sanghadasac y L. Lin, «Flexible micro-supercapacitors prepared using direct-write nanofibers,» *Royal Society of Chemistry*, 2017.
- [8] X. WANG, Y. WANG, H. LEUNG, S. C. MUKHOPADHYAY, S. CHEN y Y. CUI, «A Self-Adaptive and Wide-Range Conductivity Measurement Method Based on Planar Interdigital Electrode Array,» *IEEE explore*, 2019.
- [9] Technology Evaluation Centers, «TEC,» 2021. [En línea]. Available: <https://www3.technologyevaluation.com/>.
- [10] V. Tsouti, C. Boutopoulos, I. Zergioti y S. Chatzandroulis, «Capacitive microsystems for biological sensing,» *Elsevier*, 2011.
- [11] Real Academia Española, «Real Academia Española,» 2021. [En línea]. Available: <https://dle.rae.es/>.
- [12] National Electrical Manufacturers Association, «NEMA,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.nema.org/>.
- [13] Alumina Systems GmbH, «Alumina Systems,» 2019. [En línea]. Available: <https://alumina.systems>.