

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE GUAYAQUIL- CENTENARIO CARRERA DE ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

Simulación y análisis de impedancia de capas de nano esferas aislantes para micro almacenamiento de carga eléctrica

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

Autor:

- Andrés Efraín Espinoza Borja
- Arturo Israel Montalván Lalama

Tutor: PhD Veliz Bremen

GUAYAQUIL - ECUADOR 2022

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Andrés Efraín Espinoza Borja con documento de identificación N° 1804650743 y Arturo Israel Montalván Lalama con documento de identificación N° 0953905403; 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, 5 de enero de 2022

Atentamente,

Andrés Efraín Espinoza Borja 1804650743



Arturo Israel Montalvan Lalama 0953905403

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

Nosotros, Andrés Efraín Espinoza Borja con documento de identificación N° 1804650743 y Arturo Israel Montalván Lalama con documento de identificación N° 0953905403, 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: Simulación y análisis de impedancia de capas de nano esferas aislantes para micro almacenamiento de carga eléctrica, 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, 5 de enero de 2022

Atentamente,

Andrés Efraín Espinoza Borja 1804650743



Arturo Israel Montalván Lalama 0953905403

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Bremnen Marino Véliz Noboa con documento de identificación N° 0703865139, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: Simulación y análisis de impedancia de capas de nano esferas aislantes para micro almacenamiento de carga eléctrica, realizado por Andrés Efraín Espinoza Borja con documento de identificación N° 1804650743 y Arturo Israel Montalván Lalama con documento de identificación N° 0953905403, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 5 de enero de 2022 Atentamente,

un

Bremnen Marino Véliz Noboa 0703865139

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTO

La presente dedicatoria del Articulo Científico es primeramente para Dios, quien si no fuera por su misericordia y gracia; nada de esto sería posible. En consecuencia, a mis padres quienes han sido el motor fundamental, aquellas personas que estuvieron desde el principio siendo mi soporte y mi ancla en toda esta dura y ardua carrera. Ellos también siendo los responsables directos de mi formación como ser humano, como persona útil y contribuyente de servicio a la sociedad en la que vivimos. Las mismas personas con las que soñé y sembré mi futuro como un profesional.

También se lo dedico a mis compañeros de estudio quienes de una u otra manera formaron parte y contribuyeron, a lo largo de este camino.

Por último, está dedicado a mí, por no darme por vencido, sino que a pesar de las dificultades seguí adelante, por elegir un libro por encima de muchas distracciones, por estar dispuesto a amanecerme con responsabilidades por encima de conciliar el sueño y finalmente por no defraudarme a mí mismo, ni a los que creyeron en mí.

Andrés Efraín Espinoza Borja

Dedico este proyecto a mi mamá Janet y a mi tía Betty, por apoyarme todo este tiempo en mi carrera universitaria y profesional; y con mucho amor, trabajo y esfuerzo lograron convertirme en el profesional y ser humano que soy hoy.

Dedico este logro a todos mis familiares, que me han apoyado en el proceso para poder culminar con total éxito y satisfacción mi carrera universitaria.

Arturo Israel Montalván Lalama

RESUMEN

El presente Artículo Científico tuvo como objetivo principal el análisis, comparación y simulación de cuatro capacitores MIM, el primero con una capa de aislamiento continúa compuesta de óxido de silicio, situada en la mitad de los electrodos, las 3 simulaciones restantes MIM tienen una capa aislante discontinua de nanoesferas compuesta por el mismo componente óxido de silicio como material dieléctrico. Estas nanoesferas tienen un radio variable con respecto al número de capas que se usó como dieléctrico, todo esto con el fin de mantener un espesor del dieléctrico de 1.2 micrómetros en todos los casos.

Se utilizó el software **COMSOL** Multiphysics[®], este fue el instrumento principal para esta investigación. La ejecución pasó por varias fases de trabajo, desde la elaboración de la estructura como tal, hasta el mallado completo de la estructura. El rango de frecuencia utilizado es de 0.1 Hz a 1000 Hz, con el fin de obtener los diferentes valores de impedancia en cada modelo de condensador.

En la experimentación mediante el software se obtuvo respuestas de impedancia mediante gráficas de bode y Nyquist (Espectros de impedancia) que mostró el comportamiento capacitivo de todas las simulaciones porque el ángulo de fase salió entre -1.53 a -1.57 radianes. Las magnitudes de impedancia fueran más elevadas para la simulación compuesta de 1 capa de nanoesferas, a medida que se aumentaban las capas de nanoesferas la impedancia disminuyo, siendo la de capa continua aquella con magnitud de impedancia de menor valor.

Como resultado final se obtuvo una capacidad mayor para el capacitor de capa continua, incluso la capacidad simulada fue mayor que la capacidad teórica de un capacitor MIM. La capacidad más baja fue la de una sola capa de nanoesferas, y a medida que se aumentaba la capa de nanoesferas, aumentaba la capacidad. De acuerdo con este análisis, al haber más capas de nanoesferas habrá más material dieléctrico, habrá menos espacios de aire y por lo tanto un mayor aporte dieléctrico para aumentar la capacidad.

PALABRAS CLAVE: NANOESFERAS, MIM, ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA, NYQUIST, BODE.

ABSTRACT

The main objective of this Scientific Article was the analysis, comparison, and simulation of four MIM capacitors, the first one with a continuous insulation layer composed of silicon oxide, located in the middle of the electrodes, the 3 remaining MIM simulations have a discontinuous insulating layer of nanospheres composed of the same component silicon oxide as the dielectric material. These nanospheres have a variable radius with respect to the number of layers used as dielectric, all this in order to maintain a dielectric thickness of 1.2 micrometers in all cases.

The COMSOL Multiphysics® software was used, this was the main instrument for the research. The execution went through several work phases, from the elaboration of the structure as such, to the complete meshing of the structure. The frequency range used is from 0.1 Hz to 1000 Hz, in order to obtain the different impedance values in each capacitor model.

In the software experimentation, it was obtained impedance responses by means of bode and Nyquist plots (Impedance spectra) which showed the capacitive behavior of all simulations because the phase angle was between -1.53 to -1.57 radians. The impedance magnitudes were higher for the simulation composed of 1 layer of nanospheres, as the layers of nanospheres increased the impedance decreased, being the continuous layer the one with the lowest impedance magnitude.

As a final result, it was obtained a higher capacitance for the continuous layer capacitor, even the simulated capacitance was higher than the theoretical capacitance of a MIM capacitor. The lowest capacitance was that of a single nanosphere layer, and as the nanosphere layer was increased, the capacitance increased. According to analysis, as there are more layers of nanospheres there will be a more dielectric material, there will be fewer air gaps, and therefore a higher dielectric contribution to increasing the capacitance.

KEY WORDS: NANOSPHERES, MIM, IMPEDANCE SPECTROSCOPY, NYQUIST, BODE.

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTO	4
RESUMEN	5
ABSTRACT	6
TABLA DE CONTENIDO	7
INTRODUCCIÓN	8
METODOLOGÍA	10
Parámetros	10
Construcción de geometrías	11
Materiales de los dominios de la estructura	12
Ecuaciones	13
Mallado	13
Estudio Dominio de la frecuencia	15
Evaluación	17
RESULTADOS	
Espectros de impedancia y capacitancia	
Conclusiones	23
Recomendaciones	23
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25

INTRODUCCIÓN

Los capacitores MIM son ocupados principalmente gracias a su reducción de costos en la microelectrónica ya que estos han incrementado la densidad de los circuitos integrados debido a su densidad capacitiva alta (μ F/cm²). En paralelo a la reducción de las dimensiones de los capacitores se mejoraron otros aspectos como materiales dieléctricos más eficientes y conductores con condiciones superiores, como resultado de todas esas mejoras consecutivas se optimizó la densidad capacitiva ε/d . [1]

La estructura de estos capacitores consta de 3 elementos metal, aislante y metal. Estas piezas de la electrónica han sido bastante útiles en circuitos integrados para aplicaciones muy usadas a nivel industrial y comercial, como ejemplo se aprecia su importancia en transmisores industriales, se sabe que estos equipos captan las señales analógicas y las convierte en señales digitales para dicha conversión se usa ADC (convertidor analógico digital) y para su proceso inverso se usan DAC (convertidores digitales analógicos) en ambos casos se hace uso de los MIM en los circuitos integrados, también se puede encontrar estos capacitores en fuentes conmutadas, amplificadores y radio frecuencia. [2]

Como se aprecia en la **Figura1** Básicamente los MIM hacen uso de dos placas paralelas separadas entre sí por el material aislante (dieléctrico), su electrostática depende de la relación de la carga Q almacenada en cada una de las placas conductoras y la diferencia de voltaje V entre las placas. [3]



Figura 1: Estructura del Capacitor Tipo MIM [4]

Ecuación con vacío en el medio aislante:

$$C = \frac{Q}{V} = \varepsilon_0 \frac{A}{d}$$
 (1)

Para un medio aislante (no cristalino) [5]

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{A}{d} = \varepsilon_0 k \frac{A}{d} \quad (2)$$

k es la constante dieléctrica relativa, en pocas palabras es el valor ya establecido e invariante para el material (SiO2) que usaremos como dieléctrico entre las dos placas.

Donde:

- \mathcal{E}_0 : permitividad eléctrica del vacío su valor es 8.85x10⁻¹² F/m.
- A: Área de contacto de las placas (m²).
- *d*: espesor del dieléctrico (*m*).

En trabajos previos [1] [3] realizados en Cataluña, se fabricó un condensador MIM mediante el depósito de nanoesferas (del orden de 250 nm) de SiO2 como material aislante, se observó que la capacidad es hasta 1000 veces superior a la esperada teóricamente respecto a un capacitor convencional de las mismas dimensiones. En aquel trabajo se sugiere que la capacidad se debe a cargas debido a la humedad y a doble capas eléctricas en las interfaces.

Entonces, este artículo científico se enfoca en el diseño de un capacitor de capa discontinua cuyas nanoesferas variaran de tamaño y será comparado con un capacitor clásico de capa continua, el análisis será netamente electroestático sin incluir cargas de humedad. Los electrodos conductores, superiores e inferiores serán compuestos de Aluminio. El material aislante tanto de la capa continua y capa discontinua compuesta de nano esferas, será de óxido de silicio SiO2.

Se realizaron varias pruebas variando el número de capas del aislante y el radio de las nanoesferas, de la siguiente manera:

- Prueba 1: Capa continua de 1.2 micrómetros de espesor.
- Prueba 2: 1 capa aislante con nanoesferas de un radio de 600 nanómetros
- Prueba 3: 2 capas aislantes con nanoesferas de un radio de 300 nanómetros
- Prueba 4: 3 capas aislantes con nanoesferas de un radio de 200 nanómetros

De esta manera el aislante tendrá un espesor de 1.2 micrómetro para todos los casos.

Se conseguirán las curvas capacidad – frecuencia, diagramas Nyquist y diagramas de bode, al finalizar todo el proceso se podrá brindar las conclusiones de la comparación de los dispositivos MIM y que esto pueda servir para un futuro estudio.

METODOLOGÍA

Los modelados de los condensadores MIM (metal aislante metal) compuestos de una capa aislante discontinua de nanoesferas y capa continua, fueron efectuados por medio del software **COMSOL** Multiphysics[®] debido a que es una herramienta virtual que se especializa en el modelado y análisis de una variedad de fenómenos físicos.

En cuanto al diseño del condensador MIM de SiO2, en este artículo se diseñaron 4 prototipos conservando las medidas de la estructura del área, diámetro de separación entre placas y diseño de la geometría completa. Para la simulación de los capacitores MIM se analizó diversos espectros de impedancia mediante bode y Nyquist, haciendo uso del mismo software **COMSOL** Multiphysics[®] todo esto gracias a su amplitud de métodos y estudios físicos al momento de graficar y exportar resultados. Realizando este método experimental se pudo analizar el comportamiento del MIM con nanoesferas creadas a diferentes diámetros para nuestra capa aislante discontinua.

Parámetros

Se simula un capacitor con una diferencia de voltaje variable en el tiempo de 100 mV, aplicada sinusoidalmente. Se considera un barrido de frecuencias que van desde 0.1Hz hasta los 1000Hz y se evalúan los espectros de impedancia del dispositivo.

Name	Expression	Value	Description
freq_min	0.1[Hz]	0.1 Hz	Minimum frequency
freq_max	1000[Hz]	1000 Hz	Maximum frequency
log_freq_min	log10(freq_min[1/Hz])	0	Log of min frequency
log_freq_max	log10(freq_max[1/Hz])	3	Log of max frequency
V_app	100[mV]	100 mV	Voltage

Tabla 1: Parámetros impuestos en Comsol Multiphysics para barrido de frecuencia y entrada de voltaje 100[mV]

Construcción de geometrías

Tomando en cuenta la medida de estas nanoesferas, para la construcción general de la geometría se tomaron en cuenta las unidades en micrómetros (µm) y una unidad angular en grados (deg). Posterior a esto se estableció una dimensión de espacio en forma de cilindro con un radio y altura de 6.20µm; geometría que en pasos siguientes servirá para la simulación de una región de aire circundante sobre el MIM.

En la **Figura 2** se pueden visualizar dos placas metálicas en forma circular, estos serán los electrodos de los cuales el que se encuentra en la parte superior es el terminal al cual se le induce voltaje y el inferior representado como dominio a tierra, ambos de un radio de 3.1µm y un grosor de 0.2µm. También se pueden visualizar dos cables conductores, ambos de un radio de 0.2µm, pero de altura diferente, el inferior con altura de 2.5µm y el superior con altura de 2.1µm respectivamente.



Figura 2: Geometría Placas paralelas - Comsol Multiphysics

Diferentes modelaciones del dieléctrico como CC (capa continua), 1C (una capa de nanoesferas), 2C (doble capa de nanoesferas) y 3C (triple capa de nanoesferas).



Figura 3: Geometría Placas paralelas con dieléctrico CC, 1C, 2C y 3C - Comsol Multiphysics

Description	Value (µm)	
Layers Thickness	1.2	
Radius	3.10	
Tabla 2: Dimensiones CC - Comsol Multiphysics		

Description	Value	Quantity ≈
1C Nanospheres Radius	600 [nm]	≈ 24
2C Nanospheres Radius	300 [nm]	≈ 222
3C Nanospheres Radius	200 [nm]	≈ 680

Tabla 3: Dimensiones 1C, 2C & 3C de nanoesferas - Comsol Multiphysics

Materiales de los dominios de la estructura

Los condensadores que se modelaron están compuestos por un dieléctrico que, aunque las estructuras de estos son diferentes no varían el efecto de sus características eléctricas. Se modelo como material dieléctrico el SiO2 (oxido de silicio) con una permitividad relativa $\varepsilon_r = 3.9$ y una conductividad eléctrica pequeña $\sigma = 10e-12$ S/m [6]. También se modela una región de aire circundante ($\varepsilon_r = 1.0$, $\sigma = 0$ S/m) para tener en cuenta los campos marginales.

Para las placas del capacitor se les asigno Al (aluminio) como material conductor (σ = 35.5e6 S/m), siendo su resistividad efectiva total, mucho menor que la del SiO2.



Figura 4: Materiales aplicados en las 4 estructuras CC, 1C, 2C y 3C; Aire enfocado en el ambiente, SiO2 dieléctricos y Al placas del capacitor - Comsol Multiphysics

Ecuaciones

En la amplia variedad de estudios físicos que ofrece la interfaz de **COMSOL** Multiphysics[®], el que se utilizo fue en base a las necesidades del estudio el cual requiere que considere fenómenos eléctricos los cuales afectarán en este MIM, así como dar los datos necesarios que se necesitaron para las gráficas de muestra de cómo este inducido el condensador por el potencial eléctrico y el campo magnético.

El estudio físico escogido es Corriente Eléctrica de **COMSOL** Multiphysics^{®.} El cual considera funciones en base a parámetros preestablecidos por el estudio, ya configurados por la interfaz, y las siguientes ecuaciones automáticamente se consideran.

Conservación de la corriente:

 $\nabla \cdot \mathbf{J} = Q_{j,v} \quad \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + j\omega \mathbf{D} + \mathbf{J}_{e} \quad (4) \quad \mathbf{E} = -\nabla V \quad (5)$

Conservación de la corriente aislamiento eléctrico: ${\bf n} \cdot {\bf J} = {\bf 0}_{(6)}$

Terminal (Dominio donde se aplicará la variación de voltaje de 100[mV]):

 $V = V_0$ (7)

Tierra (Dominio de la placa inferior donde su potencial es 0):

 $V = 0_{(8)}$

Mallado

Cuando se trata de un modelado de un objeto en 3D en la interfaz de **COMSOL** Multiphysics[®], hay cuatro fases a tomar en cuenta para una modelación lo más cercana a la realidad sobre el MIM. Estas van desde la geometría completa, la selección de materiales a la estructura y su asignación; su estudio físico correspondiente y el mallado.

La interfaz utiliza un mallado tetraédrico introduciendo las funciones y los gráficos del mallado. Esto debido a que el algoritmo de mallado libre tetraédrico es más global, mismo que no considera ninguna restricción en la geometría estructural. Cada simulación de mallado se añade al siguiente mallado constituyéndose una secuencia. El producto final de la malla es el global de una construcción secuencial de todas las operaciones del mallado. Cabe mencionar que el mallado va desde medidas de extremadamente fino a extremadamente grueso esto con la finalidad de que el operador o diseñador ajuste el mallado a la estructura propuesta para el estudio físico. Por lo antes mencionado se definió en los dispositivos modelados una malla que va, desde medidas de mallado regular hasta mallado fino para las nanoesferas de tres capas.

De igual manera se pone a conocimiento las siguientes estadísticas de mallado para un posterior estudio de los diferentes MIM propuestos; CC (capa continua), 1C (una capa de nanoesferas), 2C (doble capa de nanoesferas) y 3C (triple capa de nanoesferas). Además, se muestra como observación el mallado del MIM con una capa de nano esferas **Figura 5**.

Description	Value
Minimum element quality	0.1524
Average element quality	0.6466
Tetrahedron	23751
Triangle	3868
Edge element	416
Vertex element	40
Predefined size	Regular

Tabla 4: Estadísticas de Mallado CC -Comsol Multiphysics

Description	Value
Minimum element quality	8.29E-6
Average element quality	0.6463
Tetrahedron	105552
Triangle	18836
Edge element	2125
Vertex element	148
Predefined size	Fine

Tabla 5: Estadísticas de Mallado 1C -Comsol Multiphysics

Description	Value
Minimum element quality	7.802E-5
Average element quality	0.6572
Tetrahedron	1157711
Triangle	167738
Edge element	17390
Vertex element	897
Predefined size	Finer

Tabla 6: Estadísticas de Mallado 2C -Comsol Multiphysics

Description	Value
Minimum element quality	2.47E-4
Average element quality	0.6315
Tetrahedron	4150543
Triangle	557782
Edge element	66798
Vertex element	4452
Predefined size	Finer

Tabla 7: Estadísticas de Mallado 3C -Comsol Multiphysics



Figura 5: Mallado 1C - Comsol Multiphysics

Estudio Dominio de la frecuencia

El proceso de simulación de los prototipos MIM son llevados a cabo en la fase de estudio, dando paso a una conversión de todas las fases previas puestas en evidencia. Dado la necesidad de graficas de espectro de impedancia (Bode y Nyquist) su evaluación no puede ser llevado a cabo en el dominio del tiempo. El estudio del dominio de la frecuencia es dado por la propagación de ondas mismas que se modelan mediante ecuaciones de dinámica de fluidos linealizada (ondas de presión) y dinámica estructural (ondas elásticas). Las ecuaciones completas dependen del tiempo, pero teniendo en cuenta una excitación armónica del **campo p(t)** tiene una dependencia del tiempo de la forma:

$$p(t) = pe^{i\omega t}$$
(9)

La ecuación da lugar a una respuesta igualmente armónica con la misma frecuencia; el tiempo se puede eliminar totalmente de las ecuaciones.

Hay que tomar en cuenta que para los espectros de impedancia es necesario el análisis y adquisición de datos del ángulo de fase, así como su amplitud. Dado esto, el estudio elegido es ideal para el trabajo ya que el resultado de un análisis en el dominio de la frecuencia es un campo p(t) complejo, que puede interpretarse como una amplitud $p_{amp} = abs(p)$ y un ángulo de fase $p_{phase} = arg(p)$ [7]. El campo real en cualquier punto en el tiempo es la parte real de la solución:

$$p(t) = p_{amp} \cos \left(2\pi f \cdot t + p_{phase}\right) (10)$$

El ángulo está disponible como fase variable (en radianes) y se permite en expresiones gráficas. Tanto la frecuencia (freq _{Hz}) como la frecuencia angular (omega) son variables disponibles.

Gracias a esto se puede visualizar las amplitudes y fases, así como la solución en un ángulo específico.

En los 3 modelados de MIM se aplicaron un barrido de frecuencia desde los 0.1Hz hasta los 1000Hz a un step de 0.5.

Debido a la cantidad de datos en los MIM de 2C (doble capa de nanoesferas) y 3C (triple capa de nanoesferas) su tiempo de computación tomo más de lo esperado en comparación con el de una capa de nanoesferas y capa continua.

Computation time CC	2 min 6 s
Computation time 1C	3 min 6 s
Computation time 2C	25 min 44 s
Computation time 3C	1 h 42 min 50 s

Tabla 8: Tiempo de computación, estudio Dominio de la frecuencia CC, 2C Y 3C - Comsol Multiphysics

Se debe mencionar el hecho que el solucionador predeterminado para problemas electromagnéticos utiliza un enfoque iterativo, lo que significa que la solución es dentro de una tolerancia relativa. La tolerancia relativa predeterminada para el solucionador iterativo es 10e-3, pero se puede apretar hasta 10e-6 si es necesario. Más allá de una tolerancia relativa de 10e-6 puede resultar difícil que el solucionador iterativo converja. Para profundizar un poco el tema; La tolerancia relativa está relacionada con los criterios de convergencia. Por lo tanto, si se cumple la **ecuación 11** de tolerancia relativa, se obtendrá la convergencia.

 $\frac{(solución actual-solución anterior)}{solución actual} < Tolerancia relativa (11)$

Entonces, si se disminuye la tolerancia relativa, obtendremos la solución más precisa. Sin embargo, a la interfaz le costará más tiempo debido al hecho de que se implementarán más iteraciones.

Evaluación

A continuación, una vez dada la simulación de los modelados MIM CC (capa continua), 1C (una capa de nanoesferas), 2C (doble capa de nanoesferas) y 3C (triple capa de nanoesferas). Se procedió a la exportación de datos procesados por el estudio del dominio de la frecuencia. La interfaz usa expresiones ya preinscritas por el mismo estudio, libres y disponibles al uso del operador al momento de obtener los datos requeridos.

Ahora, en teoría se conoce que la admitancia con símbolo Y e impedancia con símbolo Z, están directamente relacionados uno con una unidad de medida en S-siemens (admitancia) y el otro en Ω -ohms (impedancia), siendo la admitancia la inversa de la impedancia.

$$\mathbf{Z} = \frac{1}{j\omega C}$$
(12) $\mathbf{Y} = j\omega C$ (13)

Dado las **ecuaciones 12 y 13** se calculo primero la admitancia, posterior se pudo evaluar el módulo de la impedancia, ángulo de fase de la impedancia, parte real e imaginaria de la impedancia y por ultima la capacitancia respectiva. Esto se aplicó individualmente a cada modelado.

Expression	Unit	Description
ec.Y11	S	Admittance
abs(1/(ec.Y11))	Ω	Impedance
arg(1/(ec.Y11))	rad	Impedance Angle
real(1/(ec.Y11))	Ω	Impedance Real Part
-imag(1/(ec.Y11))	Ω	Impedance Imaginary Part
imag(ec.Y11)/ec.omega	F	Capacitance

Tabla 9: Expresiones evaluadas, estudio Dominio de la frecuencia CC, 2C Y 3C - Comsol Multiphysics

RESULTADOS

Espectros de impedancia y capacitancia

Los datos procesados para las gráficas de los espectros de impedancia [8] (Bode y Nyquist) son graficados por la misma interfaz del **COMSOL** Multiphysics[®]. Además, se grafica la capacitancia con respecto a la frecuencia, más sin embargo los MIM no presentaron cambios de comportamiento en el barrido de frecuencias evaluado.



Figura 6: Módulo y Angulo de fase, Impedancia – CC,1C,2C,3C -SiO2, 0.1Hz-1Khz - Comsol Multiphysics

Mediante el análisis de los gráficos de bode (**Figura 6**) del módulo de la impedancia y el ángulo de fase, se detecta un módulo de impedancia en CC (Capa continua) inicial de sobre los 1.6e15 ohms (Ω) que a medida que el barrido de frecuencia aumenta de los 0.1Hz a 10Hz, su modulo menora a un valor equivalente de los 1.5e13 ohms (Ω) posterior a frecuencias entre 100Hz a 100Hz su modulo sigue disminuyendo pero en menor proporción, llegando a los 1000Hz con un valor es de 1.5e11 ohms (Ω).

Los módulos de los MIM de 1C, 2C, 3C siguen el mismo comportamiento, pero a diferencia del de capa continua poseen una impedancia mayor, teniendo valores de 2.44e15 ohms (Ω) para 1C, 2.4e15 ohms (Ω) para 2C y 2.32e15 ohms (Ω) para 3C a la frecuencia inicial de 0.1Hz.

En cuanto el ángulo de fase hay una similitud de todos los MIM al desfase de ángulo de -1.57 radianes equivalentes al valor de - 89.95° grados sexagesimales. Lo cual es común en un dispositivo pasivo como el capacitor, mismo que se conoce está desfasado el voltaje con respecto a la corriente con una amplitud de 90°.



Figura 7: Capacitancia – CC, 1C, 2C, 3C y Calculada Teóricamente -SiO2, 0.1Hz-1Khz -Comsol Multiphysics

La capacitancia fue calculada teórica y posteriormente incluida en la gráfica junto a las demás capacitancias, para ello fue considerada la permitividad del SiO2, la constante de permitividad, el área circular de las placas de metal y la distancia entre ambos electrodos, superior e inferior.

$$A = \pi \cdot r^{2} (14)$$

$$A = \pi \cdot (3.1e^{-6}m)^{2} \rightarrow A = 3.019e^{-11}m^{2}$$

$$C = k\varepsilon_{0}\frac{A}{d}$$

$$C = 3.9\left(8.85e^{10^{-12}}\frac{C^{2}}{Nm^{2}}\right)\left(\frac{3.019e^{-11}m^{2}}{1.2e^{-6}m}\right)$$

$$C = 8.683e^{-10}\mu F$$

Estudiando la teoría que rige sobre los condensadores con material dieléctrico y los condensadores al vacío, se puede comprobar una capacitancia menor de los capacitores al vació con respecto a los que tienen un dieléctrico, debido a que el material dieléctrico se polariza y aporta una ganancia k. Por lo antes mencionado se llega a la conclusión que las pequeñas aperturas que existen entre las nanoesferas simulan vacío, infiriendo a que su capacitancia sea menor que la de capa continua. Por aquello conforme el diámetro de nanoesferas es menor, los márgenes de aire son más reducidos, aumentando así su capacitancia total.



Figura 8: Espectro de impedancia (Nyquist) – CC,1C,2C,3C -SiO2, 0.1Hz-1Khz - Comsol Multiphysics

El espectro de impedancia (Nyquist) de todos los condensadores MIM CC, 1C, 2C y 3C, nos revela una gráfica que denota una constancia de acrecentamiento de ohmios de la parte real Z' con respecto a la parte imaginaria Z". Los valores de la parte real Z' son de 6e13 ohms (Ω) en frecuencia de 0.1Hz y 6.34e5 ohms (Ω) a una frecuencia de 1000 Hz, en el caso de la parte imaginaria Z" tiene una resistencia inicial a 0.1 Hz diferente entre cada MIM, con valores de 2.93e15 ohms (Ω) para 1C, 2.86e15 ohms (Ω) para 2C y 2.53e15 ohms (Ω) para 3C.

Por el análisis visual se puede notar una tendencia del Nyquist de la 1C, 2C y 3C de nano esferas a la forma del condensador de capa continua. Esto se debe, a que conforme las nano esferas poseen un diámetro más pequeño su impedancia menora.



Figura 9: Slice1= Electric potential (V), Slice2= Electric field norm (V /m) Arrow Volume: Electric field. – CC -SiO2, 0.1Hz-1Khz - Comsol Multiphysics



freq(81)=1000 Hz Slice: Electric potential (V)

Figura 10: Slice1= Electric potential (V), Slice2= Electric field norm (V /m) Arrow Volume:

Electric field. – 1C -SiO2, 0.1Hz-1Khz - Comsol Multiphysics

freq(81)=1000 Hz Slice: Electric potential (V)



Figura 11: Slice1= Electric potential (V), Slice2= Electric field norm (V /m) Arrow Volume: Electric field. – 2C -SiO2, 0.1Hz-1Khz - Comsol Multiphysics



Figura 12: Slice1= Electric potential (V), Slice2= Electric field norm (V /m) Arrow Volume: Electric field. – 3C -SiO2, 0.1Hz-1Khz - Comsol Multiphysics

Para enriquecimiento del artículo se decidió graficar los MIM de SiO2 para una mejor visualización 3D (Figuras 9-12), en un plano donde considera el potencial eléctrico (Slice 1) y su campo eléctrico (Slice 2) tanto plasmado en un slice como en flechas las cuales indican la dirección del campo eléctrico [9].

Se observa que la dirección del campo eléctrico tiene un sentido que va del electrodo positivo al negativo, mientras que por fuera de las placas hay vectores que tienen magnitudes similares en dirección contraria, esto se debe a la densidad de carga de los electrodos, cancelando el campo eléctrico fuera de ellas.

Además, hay una denotación en el potencial eléctrico (Slice1) la cual era evidente, por la carga en ellas. Donde en la placa superior esta todo el potencial eléctrico aplicado, dado que es el electrodo con carga positiva, mismo que conduce el voltaje aplicado 100[mV]. Mientras que la placa inferior decae alrededor de los 0.02 V, esto dado a su bajo potencial eléctrico por ser el electrodo negativo además que en valores iniciales el voltaje es 0.

Conclusiones

Después del análisis completo de los espectros de impedancia así como la capacitancia de los diferentes MIM modelados (CC, 1C, 2C, 3C) se llega a la conclusión de que en cuanto a la impedancia de cada uno de los modelados, exceptuando el MIM de capa continua, hay una tendencia decreciente en su magnitud desde 1C hasta 3C, es decir el de mayor impedancia es el de una capa de nano esferas, y el de menos impedancia de tres capas de nano esferas, aproximando sus valores al condensador de capa continua. Los valores de ángulo de fase de todos los MIM modelados se mantienen en valores aproximado a los - 89.95° (-1.53 a -1.57 radianes). Demostrando así el desfase creado del voltaje con respecto a la corriente.

Por otro lado, sobre la capacitancia demostrada en la **Figura 7**, se concluye que el vacío entre nano esferas influye en su valor de capacidad de almacenamiento, disminuyéndola cada vez que el vacío sea más grande, es decir cuando menos capas de nanoesferas se tiene. Por lo antes mencionado se explica la poca capacitancia del MIM de una capa de nano esferas con respecto al de capa continua. Además, se llega a la conclusión que el **COMSOL** Multiphysics[®] obtiene una capacidad del MIM de capa continua de un valor mayor que el valor teórico calculado del mismo con la **ecuación2**, esto dado que la interfaz considera más valores y ecuaciones en dominio de la frecuencia.

Recomendaciones

Para futuros trabajos en el **COMSOL** Multiphysics[®] se pone a conocimiento varias recomendaciones a tomar en el proceso de las varias fases de modelación y evaluación.

- Para parámetros iniciales, es muy recomendado poner los valores que se trabajarán para voltaje, barrido de frecuencias y otros de ser necesarios. Esto dará una mejor organización y automáticamente quedarán registradas en la interfaz como variables, disponibles para poderlas llamar en el proceso.
- Tener en cuenta las unidades de medida dependiendo del modelado, como en este artículo, la escala es micrómetros.
- Se recomienda que previo a cualquier análisis se revise el estudio físico a escoger, dado que si se escoge uno erróneo su evaluación no podrá ser procesada, por la razón que la

interfaz designa estudios específicos para cada necesidad diferente. En este artículo, el estudio físico es corriente eléctrica.

- Darle mucha importancia al mallado, ya que dependiendo de la geometría se puede necesitar un mallado más fino de lo habitual, esto se debe indicar en la interfaz en el apartado de tamaño de elemento (Element size), como fue el modelado de 3C de nanoesferas con un mallado fino.
- En el estudio de frecuencia, se recomienda tener en cuenta la tolerancia relativa aquella que por configuración la viene en valor de 0.001 pero se puede ajustar hasta 1e-6 para una mejor precisión en valores, tomando en cuenta que su computación llevará más tiempo.
- Es a tomar en cuenta también, que se debe identificar las expresiones del estudio primeramente antes de una evaluación para poder llamar a los valores correcto, luego de ello se pueden combinar y crear funciones según la necesidad de análisis.

Finalmente se deja en recomendación a la Universidad Politécnica Salesiana el programa **COMSOL** Multiphysics[®], herramienta principal del desarrollo de todo el presente artículo; como un programa a tomar para futuros modelamientos de electrónica y otros estudios físicos o químicos que requieran de una proyección de datos más precisos. Gracias a su variedad de utilidades, hacen del programa una herramienta eficaz e interesante para todo tipo de estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. B. A. O. L. C. Bremnen Veliz, «Impedance modeling of silica nanoparticle metal insulator metal capacitors,» *ELSEVIER*, pp. 62-70, 2018.
- [2] P. Sanchez, F. G, J. Carrillo Lopez, A. Luna Flores y A. Morales Acevedo, Simulación de curvas CV y Ct para la caracterización eléctrica de dispositivos MIS. Superficies y vacío, Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de superficies y materiales A.C, 2002.
- [3] B. Marino Veliz, *Novel metal insulator metal capacitors based on electrosprayed colloidal nanoparticles*, Cataluña, 2020.
- [4] Comsol, «www.comsol.com,» [En línea]. Available: https://www.comsol.com/model/frequencydomain-modeling-of-a-capacitor. [Último acceso: 1 Febrero 2022].
- [5] M. Macias Garcia, C. Contreras Hinojosa y R. Anaya Zamora , *Impedancia en circuitos eléctricos de CA*, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.
- [6] S. R. Ali Nazari, «The effects of SiO2 nanoparticles on physical and mechanical properties of high strength compacting concrete.,» *Science Direct*, vol. 42, nº 3, pp. 570-578, 2011.
- [7] A. v. d. W. N. &. N. H. Pavlov, «Frequency response functions and Bode plots for nonlinear convergent systems,» *IEEE*, vol. I, 2006.
- [8] R. M.-L. R. G.-L. J. &. d. T. A. Mayén-Mondragon, «MODELADO DE ESPECTROS DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA POR EL MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO: RELACIONES TIEMPO-FRECUENCIA.,» SMEQ, vol. 4, nº 1, 2019.
- [9] G. W. Parker, « Electric field outside a parallel plate capacitor.,» American Journal of Physics, vol. vol. 70, nº 5, pp. p. 502-507., 2002.
- [10] Comsol Multiphysics, «Comsol,» 1 12 2021. [En línea]. Available: https://www.comsol.com/support/learning-center/article/26901/132.