



Dirección General de Asuntos
del Personal Académico



Resonancia en Acción: Diseñando Superficies Selectivas de Frecuencia para el Futuro Tecnológico

Presentado por:

Fernando Plata Orozco
José Ismael Martínez López

Recurso desarrollado para el proyecto PAPIIT:

IN111522

Ciudad Universitaria, CDMX. 2024



Resonancia en Acción: Diseñando Superficies Selectivas de Frecuencia para el Futuro Tecnológico © 2024 by Fernando Plata Orozco, Jose I. Martinez Lopez is licensed under Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International. To view a copy of this license, visit <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Índice general

1. Presentación	1
2. Introducción a la resonancia y a las superficies selectivas de frecuencia	4
I. ¿Qué es la resonancia?	4
II. ¿Qué son las superficies selectivas de frecuencia?	5
III. ¿Cuáles son las aplicaciones de las superficies selectivas de frecuencia?	6
3. Marco teórico	8
I. Circuito resonante serie	8
II. Circuito resonante paralelo	10
III. Modelado eléctrico de las superficies selectivas de frecuencia	11
4. Ejercicios resueltos de circuito resonante serie y paralelo	13
I. Circuito resonante serie	13
II. Circuito resonante paralelo	14
5. Simulación de una FSS	17
I. Análisis de la simulación de una FSS basada en un anillo ranurado	24
6. Ejercicios propuestos para circuitos resonantes y FSS	26
I. Circuito resonante serie	26
I.a. Ejercicio 1	26
I.b. Ejercicio 2	26
I.c. Ejercicio 3	26
II. Circuito resonante paralelo	27
II.a. Ejercicio 1	27
II.b. Ejercicio 2	27
II.c. Ejercicio 3	27
III. Superficies selectivas de frecuencia	27
III.a. Ejercicio 1	27
III.b. Ejercicio 2	28
III.c. Ejercicio 3	28
7. Conclusión	29
Referencias	30

La presente propuesta titulada: Resonancia en acción: Diseñando superficies selectivas de frecuencia para el futuro tecnológico, es sometida a la Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación de la UNAM, con base en la Convocatoria 2025.

El nivel educativo al que es aplicable es el de licenciatura. La asignatura en la que se promoverá el aprendizaje es Circuitos para Comunicaciones, correspondiente al Plan de estudios de la Carrera Ingeniería Eléctrica Electrónica. Los objetivos del curso son: El alumno diseñará circuitos para comunicaciones en las bandas de media, alta y muy alta frecuencia (MF, HF y VHF). El primer tema de esta asignatura es: Circuitos selectivos de frecuencia, el cual tiene como objetivo que el alumno diseñará circuitos selectivos de frecuencia. El contenido de este tema incluye Circuitos resonantes RLC y diseño de circuitos selectivos de frecuencia.

La resonancia y las superficies selectivas de frecuencia son temas relevantes en el estudio de la propagación electromagnética, las telecomunicaciones, y el diseño de circuitos electrónicos avanzados. Sin embargo, su complejidad conceptual puede dificultar su comprensión sin recursos didácticos bien estructurados.

Las FSS son estructuras periódicas que presentan propiedades de filtrado electromagnético controlado, esenciales para aplicaciones en antenas, metamateriales, diseño de radares, y sistemas de comunicaciones avanzados. Estas aplicaciones se relacionan directamente con áreas tecnológicas clave, como las redes 5G, Internet de las cosas (IoT) y las superficies inteligentes reconfigurables. Además, la resonancia, un fenómeno central en el diseño de las FSS, está presente en numerosas disciplinas, desde la física hasta la ingeniería avanzada.

La contribución académica consiste en elaborar un producto educativo sobre resonancia y FSS que permita:

- Promover el autoaprendizaje: Facilitar a los estudiantes de recursos claros y accesibles que combinen teoría, ejemplos prácticos y simulaciones.
- Fomentar la investigación aplicada: Ofrecer materiales que promuevan el diseño y análisis de estructuras resonantes y FSS en proyectos de ingeniería o ciencia aplicada.
- Desarrollar competencias tecnológicas: Fortalecer habilidades en software de simulación

numérica de circuitos y diseño electromagnético, como CST, ADS o MATLAB, mediante diseños concretos.

Los autores consideran que este producto educativo se alinea con la misión de la RUA de promover recursos educativos de acceso abierto, contribuyendo a reducir las barreras al conocimiento especializado. También potenciará la capacidad de los estudiantes para enfrentarse a los retos tecnológicos actuales, asegurando una transferencia de conocimiento efectiva y actualizada. El material incluirá:

- Bases teóricas: Explicaciones básicas sobre resonancia y principios fundamentales de FSS.
- Ejercicios prácticos: Problemas y simulaciones guiadas que relacionen los conceptos teóricos con aplicaciones reales.
- Diseño y Simulaciones de FSS: Diseño y simulaciones que ilustren fenómenos como la transmisión y reflexión en las FSS y su conexión con los circuitos resonantes.

Los objetivos didácticos de la presente propuesta son:

- Comprensión conceptual de fenómenos físicos: Conocer los principios fundamentales de la resonancia, incluyendo su definición, tipos y características, para comprender su importancia en diversos fenómenos físicos y facilitar que los estudiantes comprendan los principios de resonancia y las propiedades electromagnéticas fundamentales de las superficies selectivas de frecuencia, incluyendo transmisión y la reflexión de las ondas electromagnéticas.
- Identificación de casos prácticos. Identificar ejemplos cotidianos y tecnológicos donde se aplica la resonancia, como instrumentos musicales, circuitos eléctricos, y sistemas mecánicos.
- Conexión entre teoría y práctica: Brindar herramientas que relacionen los conceptos teóricos de la resonancia y el diseño de las FSS con aplicaciones prácticas en ingeniería
- Desarrollo de habilidades analíticas y críticas: Promover que los estudiantes analicen el comportamiento de estructuras resonantes y FSS mediante simulaciones numéricas, permitiéndoles identificar geometrías, evaluar resultados y tomar decisiones fundamentadas sobre diseños y parámetros clave de las FSS.
- Fortalecimiento de competencias en simulación y diseño: Introducir a los estudiantes en el uso de herramientas de software especializado (como CST, ADS o MATLAB) para modelar, simular y optimizar el desempeño de FSS, fortaleciendo sus competencias tecnológicas y metodológicas.

- Estímulo de la creatividad y la innovación: Fomentar el diseño y la evaluación de nuevas geometrías de FSS adaptadas a necesidades específicas, estimulando así el pensamiento creativo del estudiante y la capacidad para desarrollar soluciones innovadoras en contextos tecnológicos.
- Preparación para futuros retos profesionales: Equipar a los estudiantes con conocimientos y habilidades prácticas en tecnologías emergentes, preparándolos para abordar desafíos en áreas como redes 5G, Internet de las cosas (IoT), radares y superficies inteligentes reconfigurables.

Consideramos que este producto será una herramienta valiosa para fortalecer la comprensión de conceptos avanzados y su aplicación tecnológica, contribuyendo al desarrollo de habilidades de investigación de los estudiantes.

2

Introducción a la resonancia y a las superficies selectivas de frecuencia

Tema I ¿Qué es la resonancia?

La resonancia es un fenómeno fundamental en la física, la ingeniería y muchas otras ciencias, ya que permite amplificar la respuesta de un sistema cuando la frecuencia de la señal de excitación es igual a su frecuencia natural de oscilación. En la física, permite explicar los comportamientos en ondas, vibraciones y sistemas mecánicos, mientras que en ingeniería se utiliza para optimizar circuitos eléctricos, diseñar estructuras resistentes y mejorar la calidad acústica, entre otros usos. En áreas como la química y la biología, la resonancia es clave en técnicas como la resonancia magnética nuclear y la obtención de imágenes médicas, mientras que en astronomía permite comprender el comportamiento dinámico de los cuerpos celestes, así como predecir sus patrones orbitales. Además, en las ciencias de los materiales, se emplea en el diseño de metamateriales avanzados. Su relevancia radica en su capacidad para maximizar la transferencia de energía, mejorar la eficiencia y resolver problemas complejos en tecnología.

Entre los múltiples ejemplos de resonancia en la vida cotidiana, se puede mencionar la afinación de una guitarra, donde el músico aplica una tensión adecuada a las cuerdas para que éstas vibren a las frecuencias de las notas musicales deseadas. En los vehículos, los sistemas de suspensión amortiguan vibraciones no deseadas tomando en cuenta el principio de la resonancia. En los equipos médicos, los ultrasonidos y la resonancia magnética permiten diagnósticos no invasivos. También es esencial en el área de la construcción, para diseñar edificios y puentes que eviten ser dañados por vibraciones resonantes durante terremotos o vientos fuertes. Su impacto se extiende desde dispositivos cotidianos hasta estructuras esenciales para nuestra vida.

En los circuitos eléctricos, la resonancia es un fenómeno que se produce cuando una señal de corriente alterna se conecta a un circuito con una impedancia particular, típicamente compuesta por una combinación de elementos resistivos, capacitivos e inductivos. Cuando la frecuencia de la señal aplicada coincide con la frecuencia natural del circuito, se produce una amplificación significativa de la señal debido a la interacción entre los diversos componentes del circuito, lo que se conoce como el efecto de la resonancia. En esta frecuencia de resonancia, las magnitudes

de las reactancias capacitivas e inductivas se compensan mutuamente, anulándose entre sí, de modo que la impedancia total del circuito se reduce a su componente puramente resistiva. Como resultado, la energía de la señal se transfiere de manera más eficiente a la carga conectada. Por el contrario, en las frecuencias que se encuentran alejadas de la frecuencia resonante, alguna de las reactancias (inductiva o capacitiva) dominará sobre la otra, lo que modificará la impedancia total del circuito limitando así la transferencia de energía. Lo que sucede en la frecuencia de resonancia en el circuito eléctrico es que la corriente es máxima (circuito resonante serie) o el voltaje es máximo (circuito resonante paralelo) haciendo que el circuito sea altamente eficiente para transmitir o recibir energía a esa frecuencia.

Este fenómeno tiene un papel fundamental en el diseño y el funcionamiento de numerosos dispositivos electrónicos, desde los receptores de radio y televisión hasta los circuitos de comunicación inalámbrica y los sistemas de filtrado de señales. Por ejemplo, un usuario de radio o televisión debe sintonizar su receptor a la frecuencia de la emisora que desea escuchar o ver, de modo que el circuito del receptor entre en resonancia con la señal transmitida y permita así una recepción óptima de la información.

Tema II ¿Qué son las superficies selectivas de frecuencia?

Las superficies selectivas de frecuencia (FSS, por sus siglas en inglés) son arreglos periódicos bidimensionales de elementos geométricos que interactúan con las ondas electromagnéticas incidentes de manera controlada, permitiendo la manipulación de sus propiedades en función de la frecuencia, la polarización o el ángulo de incidencia. Estas superficies son ampliamente utilizadas en aplicaciones donde se requiere filtrar, reflejar, transmitir o absorber señales en rangos específicos del espectro electromagnético. Las FSS logran su propósito a través de fenómenos de resonancia electromagnética, en los que sus elementos constitutivos interactúan de forma selectiva con ciertas frecuencias para dejarlas pasar mientras discriminan las restantes. Dichos elementos pueden ser parches metálicos sobre un sustrato dieléctrico, o también pueden ser ranuras sobre una pantalla metálica tal como se muestra en la Figura 2.1. Cuando a una frecuencia determinada la longitud de la onda electromagnética incidente es proporcional al tamaño del parche metálico, se produce la reflexión de dicha onda, mientras que las demás frecuencias pueden atravesar la superficie sin ser obstruidas obteniéndose así un filtro de rechazo de banda. Por el contrario, para una superficie tipo ranura las frecuencias que pueden atravesar la estructura son aquellas cuyas longitudes de onda son cercanas a las dimensiones de la ranura, y las frecuencias restantes son reflejadas, por lo que la respuesta para este caso es el de un filtro

paso banda [Munk, 2005, Wu, 1995].

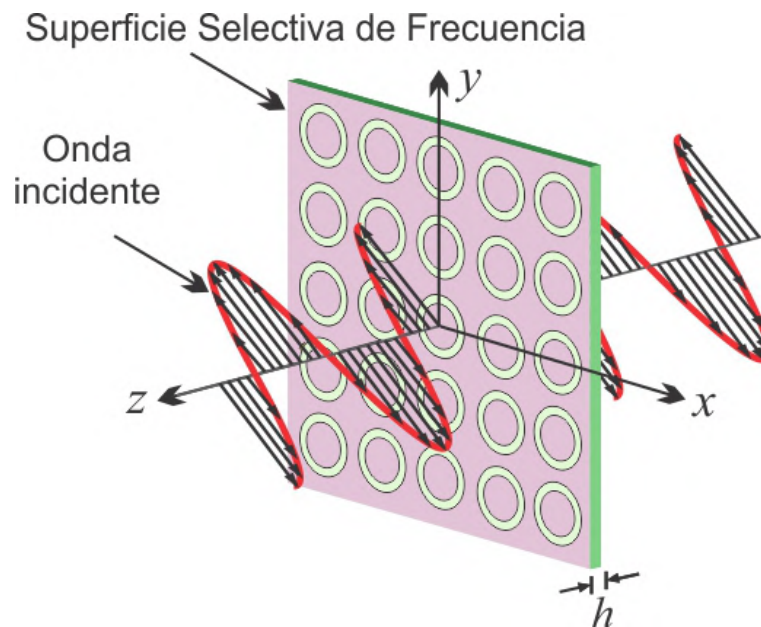


Figura 2.1: Superficie selectiva de frecuencia

Tema III ¿Cuáles son las aplicaciones de las superficies selectivas de frecuencia?

Existen numerosas aplicaciones de las superficies selectivas de frecuencia, quizá la más conocida es la rejilla de la ventana de los hornos de microondas, que tiene una función muy importante para garantizar la seguridad mientras el dispositivo está en uso. La rejilla metálica es una superficie selectiva de frecuencia que está diseñada para bloquear las microondas, mientras que la luz visible pasa a través de ella. Esto permite observar los alimentos mientras se están cocinando dentro del horno, pero no permite el paso hacia el exterior de las ondas electromagnéticas de la frecuencia que utiliza el microondas para el calentamiento de los alimentos, de esta forma las microondas se quedan atrapadas en la cavidad del horno, evitando que se escapen y puedan causar un daño a la persona que está usando el dispositivo.

Las aplicaciones más utilizadas de las FSS son las siguientes:

- 1 Tecnología RFID [Lazaro et al., 2013].
- 2 Antenas [So et al., 2013].
- 3 Tecnología *stealth* [Kim et al., 2008].
- 4 Protección contra interferencia electromagnética [Syed et al., 2014].
- 5 Comunicación móvil [Li et al., 2017].
- 6 Sensores [Lee et al., 2017].
- 7 *Wearables* SSF [Seager et al., 2013].

3

Marco teórico

Existen dos configuraciones básicas de circuitos resonantes: el circuito resonante serie y el circuito resonante paralelo. En el primer caso, la resonancia se produce cuando la reactancia inductiva y la reactancia capacitiva tienen la misma magnitud y se cancelan mutuamente presentando así una impedancia mínima, mientras que en el segundo caso, la resonancia se produce cuando la impedancia del circuito alcanza su valor máximo. Los circuitos resonantes serie y paralelo presentan características y aplicaciones diferentes, complementándose de manera efectiva en el diseño de diversos sistemas electrónicos [Edminister, 1988].

Tema I Circuito resonante serie

El circuito resonante serie está compuesto por un resistor, un inductor y un capacitor conectados en una misma trayectoria, de modo que la corriente que circula por el circuito es la misma que atraviesa por cada uno de los componentes. Este tipo de circuito se caracteriza por presentar una impedancia mínima a la frecuencia de resonancia, permitiendo que la corriente se maximice en dicha frecuencia.

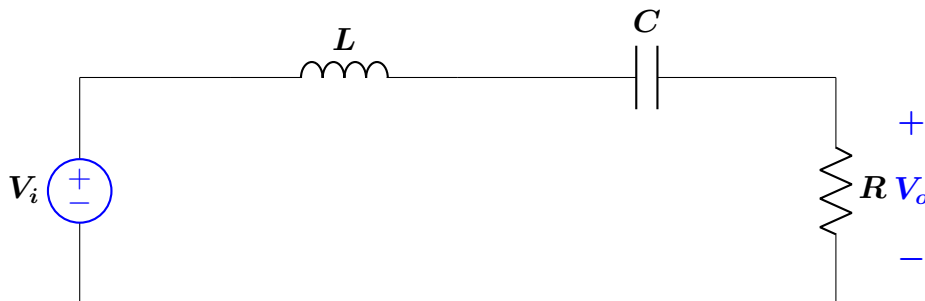


Figura 3.1: Circuito resonante serie.

En el circuito de la Figura 3.1, R es el valor de la resistencia, el inductor L tiene una reactancia inductiva dada por $X_L = \omega L$ y el capacitor C tiene una reactancia capacitiva dada por $X_C = \frac{1}{\omega C}$ [Sedra and Smith, 2015] .

La impedancia total Z del circuito resonante RLC serie es la suma de la resistencia y las reactancias inductiva y capacitiva descritas en la siguiente ecuación:

$$Z = R + j(X_L - X_C) \quad (3.1)$$

La resonancia de este circuito ocurre cuando las reactancia capacitiva e inductiva tiene la misma magnitud, es decir:

$$X_L = X_C \quad (3.2)$$

Sustituyendo en esta ecuación X_L y X_C por su definición wL y $\frac{1}{wC}$ respectivamente, tenemos:

$$wL = \frac{1}{wC} \rightarrow w^2 = \frac{1}{LC} \rightarrow w = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.3)$$

Finalmente, expresando la ecuación anterior en hercios, donde $w = 2\pi f$, se obtiene la expresión de la frecuencia de resonancia:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.4)$$

En donde:

- f_0 = frecuencia de resonancia en hercios.
- C = Capacitancia en faradios.
- L = Inductancia en henrios.

Para este circuito encontramos su función de transferencia de la siguiente forma:

Primero representamos el circuito con impedancias y recordamos que la ecuación de una función de transferencia $H(s)$ relaciona el voltaje de salida con el voltaje de entrada en términos de la variable $s = jw$ mediante la siguiente relación:

$$H(s) = \frac{V_{in}(s)}{V_{out}(s)} \quad (3.5)$$

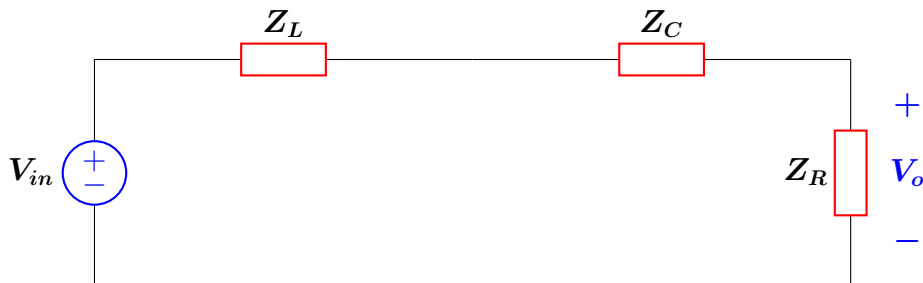


Figura 3.2: Circuito resonante serie representado por impedancias.

En donde:

- $Z_R = R$
- $Z_L = sL$
- $Z_C = \frac{1}{sC}$

Al saber que todas las impedancias se encuentran en serie, éstas se suman para encontrar la impedancia total que llamaremos $Z(s)$:

$$Z(s) = Z_R + Z_L + Z_C = R + sL + \frac{1}{sC} \quad (3.6)$$

Si tomamos el voltaje de salida como el voltaje a través de la resistencia R , la función de transferencia puede obtenerse mediante un divisor de voltaje:

$$H(s) = \frac{VR(s)}{Vin(s)} = \frac{R}{Z(s)} = \frac{R}{R + sL + \frac{1}{sC}} \quad (3.7)$$

Representando esta ecuación en su forma canónica, se llega a la siguiente expresión:

$$H(s) = \frac{s \frac{R}{L}}{s^2 + s \frac{R}{L} + \frac{1}{LC}} \quad (3.8)$$

Esta ecuación nos es útil para conocer la respuesta del circuito en función de la frecuencia tanto en magnitud como en fase. Es posible demostrar que para circuitos resonantes de banda angosta, el ancho de banda BW y el factor de calidad Q están dados por:

$$BW = \frac{R}{L} \quad (3.9)$$

$$Q = \frac{w_0 L}{R} \quad (3.10)$$

Tema II Circuito resonante paralelo

El circuito resonante paralelo está compuesto por un resistor R , un inductor L y un capacitor C conectados en una configuración paralela, es decir, comparten las mismas terminales de entrada y salida. Este tipo de circuito se caracteriza por presentar una impedancia máxima a la frecuencia de resonancia, lo que se traduce en un voltaje máximo a través de la carga. Este circuito también es llamado circuito tanque y tiene muchas aplicaciones en sistemas electrónicos, como en la etapa de sintonización de receptores de radio y televisión, ya que permite seleccionar una determinada banda de frecuencias de la señal de entrada.

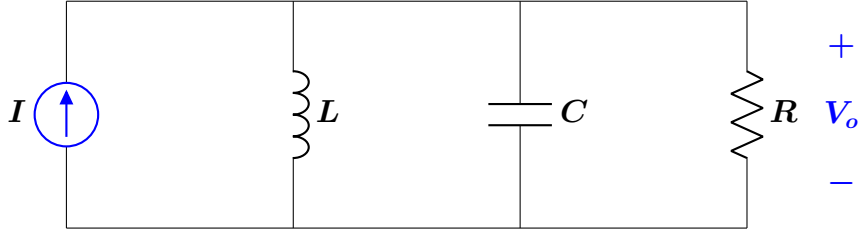


Figura 3.3: Circuito resonante paralelo.

De forma análoga al desarrollo de la sección anterior, se puede obtener la función de transferencia $H(s)$ relacionando el voltaje de salida V_o con la corriente de entrada I .

$$H(s) = \frac{s \frac{1}{RC}}{s^2 + s \frac{1}{RC} + \frac{1}{LC}} R \quad (3.11)$$

Las ecuaciones del ancho de banda y el factor de calidad del circuito resonante paralelo son las siguientes:

$$BW = \frac{1}{RC} \quad (3.12)$$

$$Q = w_0 RC \quad (3.13)$$

Tema III Modelado eléctrico de las superficies selectivas de frecuencia

Las superficies selectivas de frecuencia pueden ser modeladas mediante un circuito eléctrico equivalente que corresponde a un circuito resonante. El comportamiento de una FSS de tipo ranura puede modelarse mediante un circuito resonante paralelo. En este caso, el campo eléctrico que se concentra en la ranura puede representarse mediante un capacitor C , mientras que las corrientes superficiales que circulan en el metal se pueden modelar mediante un efecto inductivo con el inductor L . Para el caso de una FSS tipo parche, el resonador serie puede representar el efecto capacitivo que existe entre los elementos contiguos de las celdas periódicas, mientras que el inductor en serie modela las corrientes superficiales que circulan en el parche metálico. En ambos modelos, tanto en el serie como en el paralelo, la resistencia R modela las pérdidas de inserción de la FSS.

En la Figura 3.4 se presenta la concentración del campo eléctrico así como las corrientes superficiales en una SSF basada en un anillo ranurado para una onda electromagnética de polarización vertical, es decir que su vector de campo eléctrico es perpendicular al eje y .

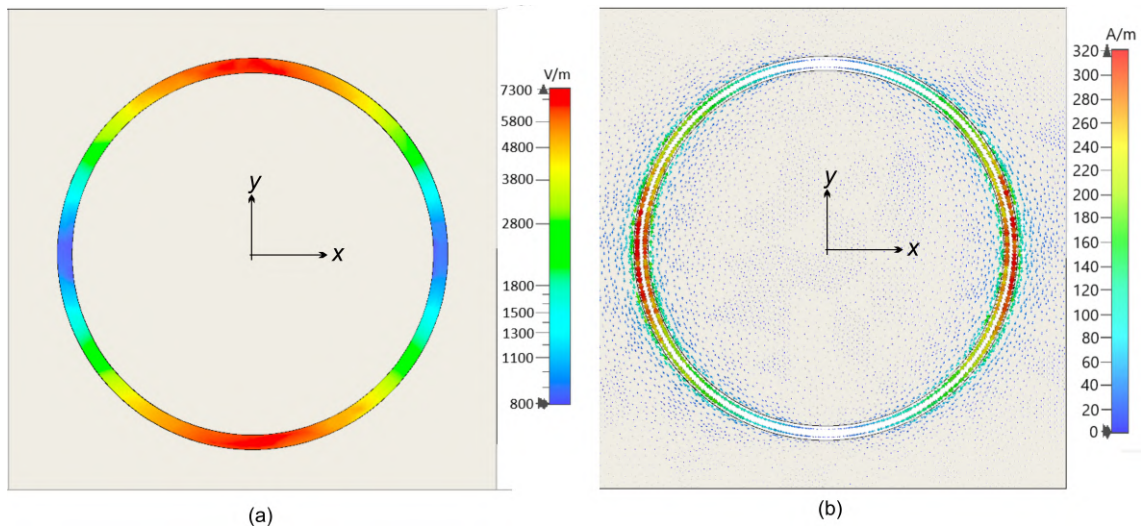


Figura 3.4: (a) campo eléctrico y (b) corrientes superficiales en una FSS con geometría de anillo ranurado.

Puede observarse que la mayor concentración del campo eléctrico aparece en la parte superior e inferior de la superficie, y como sabemos, en las ondas electromagnéticas los campos eléctricos y magnéticos son perpendiculares entre sí. Puede también observarse que donde fluyen las corrientes de superficie en las partes metálicas derecha e izquierda se forman las inductancias. La combinación de estos dos componentes siguen la relación de las ecuaciones descritas anteriormente. Es posible generar un circuito equivalente para dichas superficies tal como se muestra en la Figura 3.5.

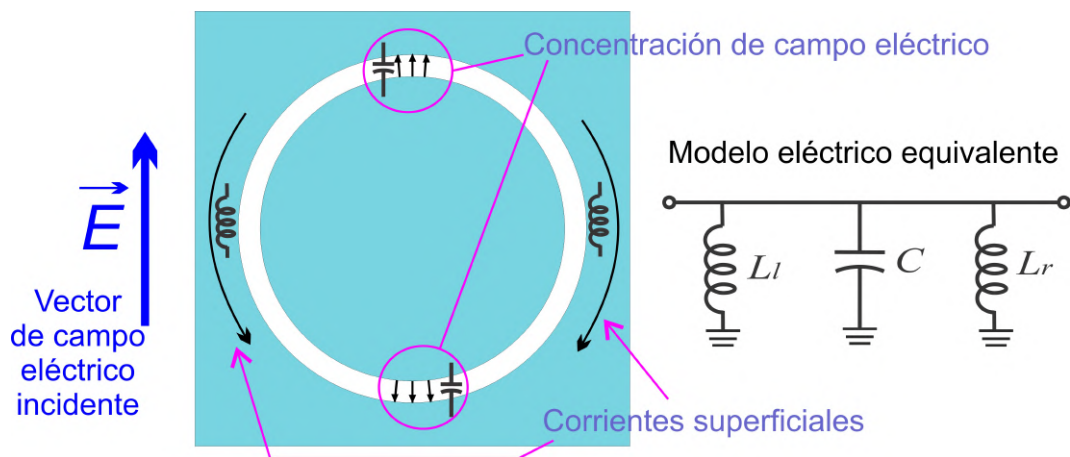


Figura 3.5: Superficie selectiva de frecuencia con componentes electrónicos equivalentes generados.

4

Ejercicios resueltos de circuito resonante serie y paralelo

A continuación se presentan una serie de ejercicios de circuitos resonantes donde además se toman en consideración otros elementos del circuito, tales como la resistencia de la fuente y la resistencia del inductor. Cabe señalar que las ecuaciones X siguen siendo válidas, solo que la resistencia R debe ser sustituida por la resistencia equivalente R_{eq} según corresponda al circuito serie o paralelo.

Tema I Circuito resonante serie

Diseñar un circuito resonante serie para una frecuencia de resonancia $f_0 = 35$ MHz y un factor de calidad $Q = 20$. Considerar una resistencia del generador $R_s = 50 \Omega$, una resistencia serie del inductor $r_L = 1 \Omega$ y una resistencia de carga $R_L = 50 \Omega$.

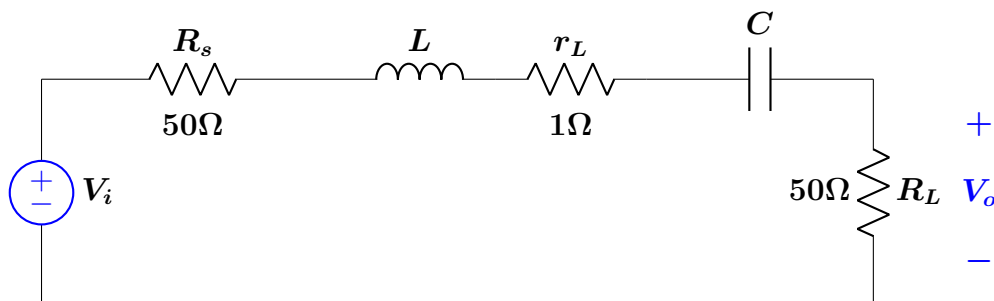


Figura 4.1: Solución del ejercicio IV.a.

Respuesta:

Sabiendo que las ecuaciones del circuito resonante serie son las siguientes:

$$BW = \frac{w_0}{Q} = \frac{R}{L}, w_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4.1)$$

Obteniendo la resistencia equivalente

$$R_{eq} = R_s + R_L + r_L = 50 + 50 + 1 = 101 \Omega \quad (4.2)$$

De la ecuación (1) primero obtenemos el ancho de banda

$$BW = \frac{2\pi 35 \times 10^6}{20} = 10.995 \times 10^6 \text{ rad/s} \quad (4.3)$$

Despejando la inductancia de la ecuación

$$L = \frac{R}{BW} = \frac{101}{10.995 \times 10^6} = 9.18 \mu\text{H} \quad (4.4)$$

Ahora para la capacitancia

$$C = \frac{1}{\omega_0^2 L} = \frac{1}{(2\pi 35 \times 10^6)(9.18 \times 10^{-6})} = 2.25 \text{ pF} \quad (4.5)$$

Teniendo:

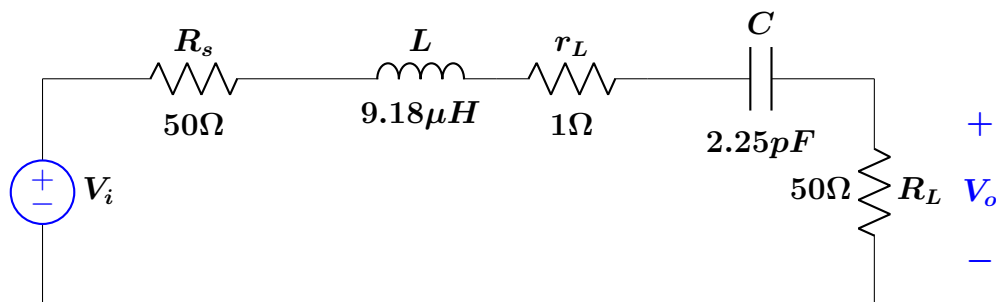


Figura 4.2: Solución del ejercicio.

Tema II Circuito resonante paralelo

Analizar y diseñar un circuito resonante paralelo a una frecuencia de resonancia $f_0 = 20$ MHz, Factor de calidad $Q = 10$ y resistencia de carga $R_L = 50 \Omega$

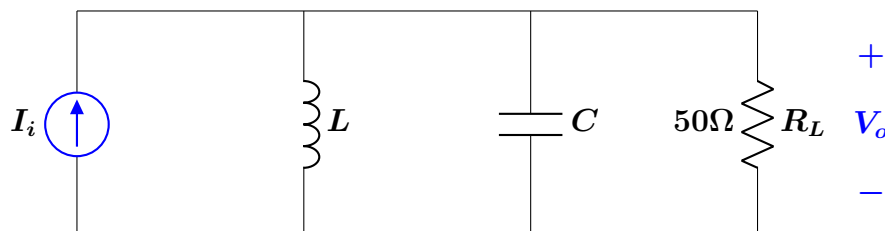


Figura 4.3: Circuito del ejercicio.

Respuesta:

Sabiendo que las ecuaciones del circuito resonante paralelo son las siguientes:

$$BW = \frac{w_0}{Q} = \frac{1}{RC}, w_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4.6)$$

De la ecuación 4.6 primero obtenemos el ancho de banda

$$BW = \frac{(2\pi)(20 \times 10^6)}{10} = 12.56637 \times 10^6 \text{ rad/s} \quad (4.7)$$

Ahora para la capacitancia

$$C = \frac{Q}{w_0 R} = \frac{10}{(2\pi 20 \times 10^6)(50)} = \boxed{1.591 \text{ nF}} \quad (4.8)$$

Despejando la inductancia de la ecuación

$$L = \frac{1}{w_0^2 C} = \frac{1}{((2\pi)(20 \times 10^6))^2 (1.591 \times 10^{-9})} = \boxed{39.8 \text{ nH}} \quad (4.9)$$

Teniendo:

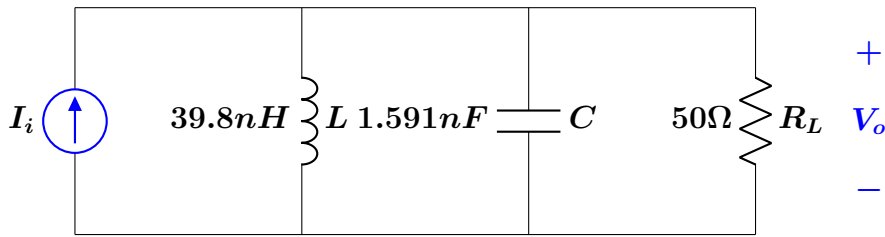


Figura 4.4: Solución del ejercicio

Las gráficas de la respuesta del circuito en magnitud y en fase pueden ser obtenidas mediante el lenguaje de programación y cálculo numérico MATLAB [The MathWorks, 2024]. Obtenemos la respuesta del circuito anteriormente diseñado mediante su función de transferencia y graficamos las características de magnitud y fase utilizando MATLAB tal como se muestra en la Figura 4.5.

$$\frac{V_0(s)}{V_i(s)} = R \frac{s \frac{1}{RC}}{s^2 + s \frac{1}{RC} + \frac{1}{LC}} \quad (4.10)$$

$$\frac{V_0(s)}{V_i(s)} = 50 \cdot \frac{s \frac{1}{50(39.8 \times 10^{-9})}}{s^2 + s \frac{1}{50(39.8 \times 10^{-9})} + \frac{1}{(1.591 \times 10^{-9})(39.8 \times 10^{-9})}} \quad (4.11)$$

$$\frac{V_0(s)}{V_i(s)} = 50 \cdot \frac{s(502512)}{s^2 + s(502512) + (1.57914 \times 10^{16})} \quad (4.12)$$

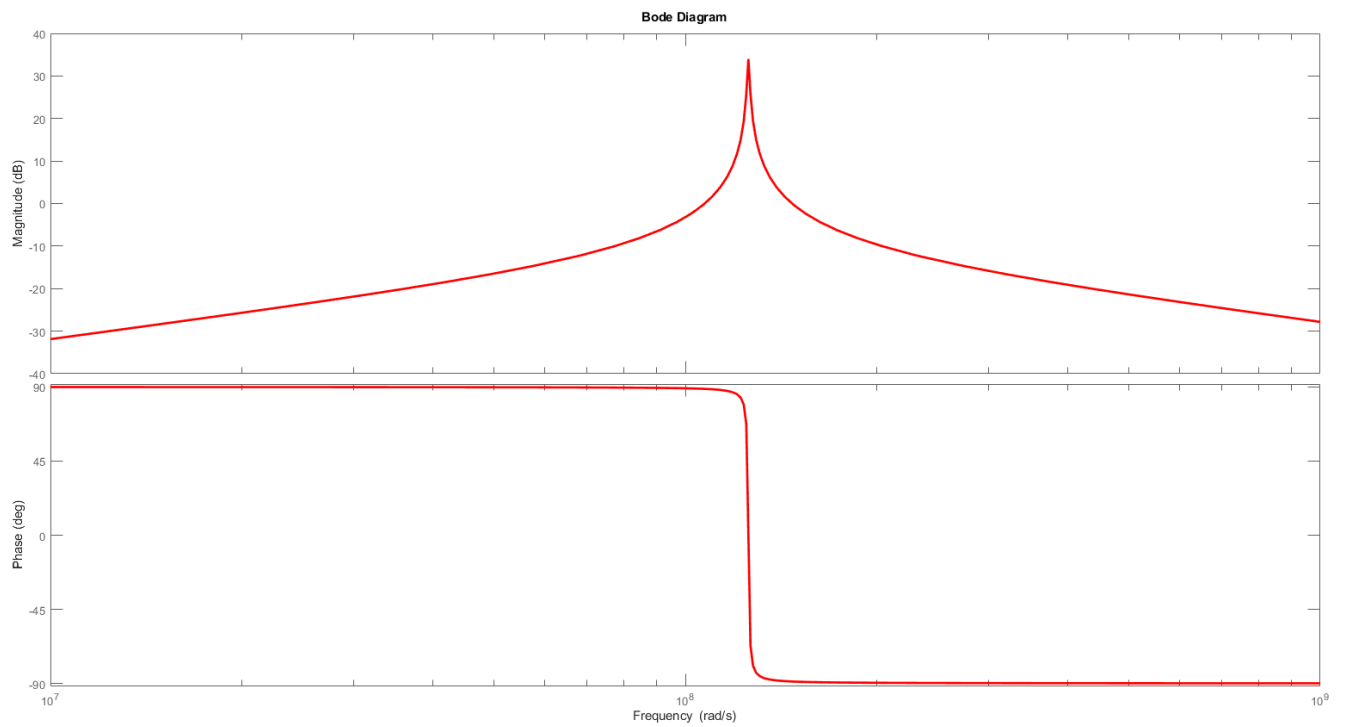


Figura 4.5: Diagrama de bode

En donde $1.26 \times 10^8 \text{ rad/s}$ corresponde a una frecuencia de resonancia de 20 MHz, ya que $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$.

5

Simulación de una FSS

La simulación de las características de transmisión y reflexión de una FSS se lleva a cabo mediante un software de electromagnetismo computacional basado en un método de onda completa. Existen diferentes softwares comerciales tales como CST Studio Suite, EMPro y HFSS, entre otros. También es posible desarrollar un código propio que utilice alguno de los siguientes métodos: Método del elemento finito, Método de diferencias finitas en el dominio del tiempo o el Método de momentos.

Los resultados de la simulación numérica están dados mediante los parámetros de dispersión S . El coeficiente S_{21} representa el coeficiente de transmisión del puerto 1 (entrada) al puerto 2 (salida), mientras que el coeficiente S_{11} es el coeficiente de reflexión en el puerto 1. Los parámetros S permiten encontrar la respuesta del circuito cuando se encuentra en condiciones de acoplamiento. En este caso la FSS se encuentra acoplada al espacio libre, por lo que la impedancia característica de dicho medio es igual a 120π .

A continuación se presenta un breve tutorial para simular una FSS usando CST Studio Suite versión 2024 [Systèmes, 2024]. Se construirá la celda unitaria de una SSF basada en un anillo tipo ranura sobre un sustrato comercial. El diseño utiliza laminados RO4003, un material de bajas pérdidas dieléctricas fabricado por Rogers Corporation, ampliamente utilizado en aplicaciones de alta frecuencia [Rogers Corporation, 2021]. La geometría de la celda unitaria de la FSS basada en un anillo ranurado de acuerdo con la Figura 5.1 está dada a continuación:

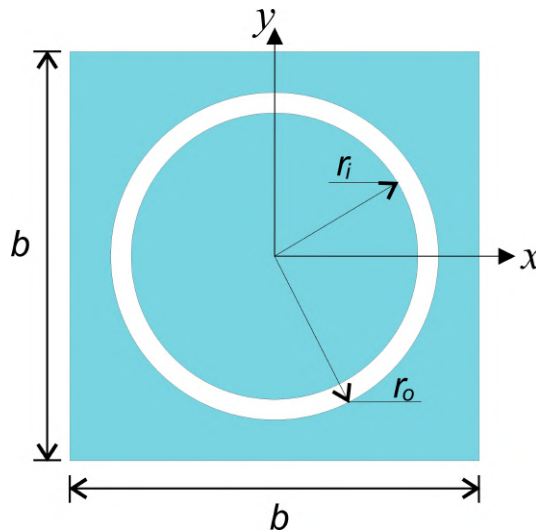


Figura 5.1: Celda unitaria

Periodo de la celda: $b = 10$ mm

Radio interior: $r_i = 3.7$ mm

Radio exterior: $r_o = 4.1$ mm

Grosor del cobre: $t = 0.017$ mm

Grosor del sustrato dieléctrico: $h = 0.230$ mm

Permitividad dieléctrica del sustrato: $\epsilon_r = 3.55$

Los pasos a seguir son los siguientes:

Paso 1. Crear una plantilla de proyecto. En este primer paso se debe inicializar el software indicando cuál es la plantilla adecuada para llevar a cabo la simulación. La plantilla proporciona un formato y estructura consistente con el problema electromagnético que se quiere resolver. En nuestro caso elegiremos el área de aplicación: *Microwaves&RF/optical*, que a su vez nos proporciona diversas opciones, de las cuales elegiremos *Periodic Structures* que es donde se encuentra el flujo de trabajo de la aplicación que queremos simular.

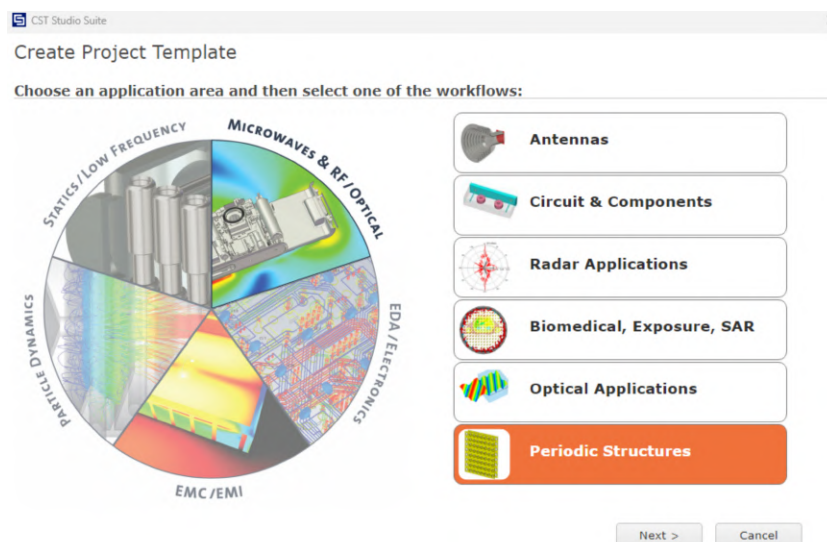


Figura 5.2: Definición de la plantilla del proyecto

Paso 2. Seleccionar el flujo de trabajo. En nuestro caso vamos a elegir la opción: *FSS*, *Metamaterial-Unit Cell* para simular solo una celda unitaria de la SSF. Este método de análisis considera un arreglo infinito de elementos basado en dicha celda unitaria, lo que permite obtener resultados con un menor costo computacional.

Create Project Template

MW & RF & OPTICAL | Periodic Structures

Please select a workflow:

FSS, Metamaterial – Unit Cell

FSS – Full Structure

Metamaterial – Full Structure

Figura 5.3: Selección del flujo de trabajo.

Paso 3. Elegir la opción *Phase Reflection Diagram* que permite encontrar los parámetros principales de la FSS.

Create Project Template

MW & RF & OPTICAL | Periodic Structures | FSS, Metamaterial – Unit Cell

Please select a workflow:

Dispersion Diagram -
Rectangular Lattice (90
degree)Dispersion Diagram -
Hexagonal Lattice (60
degree)Phase Reflection
Diagram

Figura 5.4: Selección del tipo de tipo de análisis.

Paso 4. Elegir el método de solución. En nuestro caso elegiremos la solución en el dominio de la frecuencia.

Create Project Template

MW & RF & OPTICAL | Periodic Structures | FSS, Metamaterial – Unit Cell | Phase Reflection Diagram | **Solvers**

The recommended solvers for the selected workflow are:

Frequency Domain

Time Domain
for normal incidence only

Figura 5.5: Selección del método de solución.

Paso 5. Elegir las unidades del proyecto. Elegiremos las unidades de milímetros (mm) para las dimensiones, giga hercios (GHZ) para las frecuencias y nanosegundos (nS) para el tiempo.

Please select the units:

Dimensions:

Wavelength / Freq.:

Time:

Figura 5.6: Selección de las unidades.

Paso 6. Definir el intervalo de frecuencias de simulación. Aquí elegiremos el intervalo de 6 a 16 GHz. Se selecciona este intervalo considerando que este intervalo de frecuencias cubre la respuesta principal tomando en cuenta las dimensiones de la celda unitaria que se va a utilizar.

Please select the Settings

Define using ☒ Frequency ☐ Wavelength

Frequency Min.: GHz

Frequency Max.: GHz

Monitors: ☐ E-field ☐ H-field ☐ Farfield ☐ Power flow ☐ Power loss

Define at GHz
Use semicolon as a separator to specify multiple values.
e.g. 20;30;30.1;30.2;30.3

☐ Calculate reflectance, transmittance and absorbance

Figura 5.7: Selección del intervalo de frecuencias.

Paso 7. Revisar los parámetros de simulación. En este paso se verifica que se hayan elegido los parámetros correctos. En caso de que así sea, se da por terminado el proceso de creación de la plantilla de proyecto.

Please review your choice and click 'Finish' to create the template:

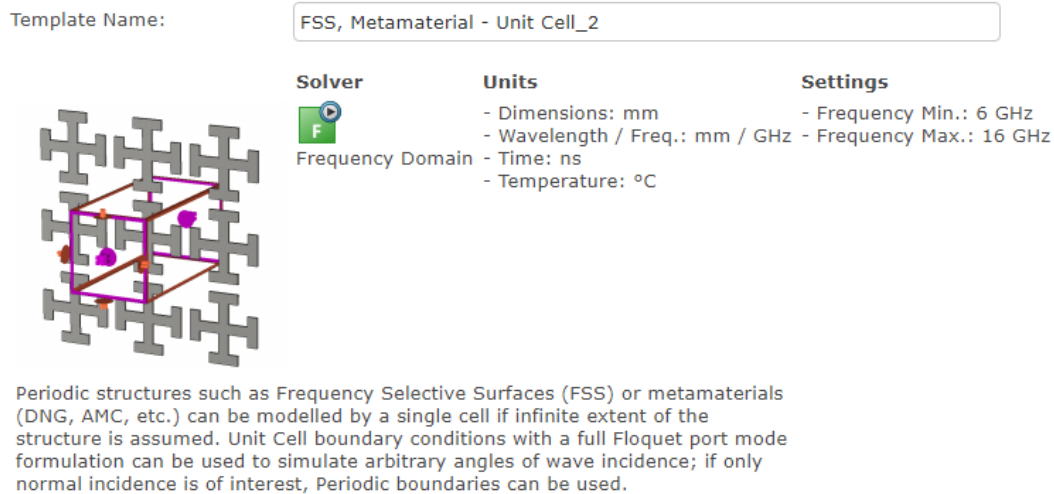


Figura 5.8: Resumen de los parámetros de la plantilla de proyecto

Paso 8. Visualizar el área de trabajo. Después de haber creado la plantilla de proyecto, se despliega el área de trabajo. Estamos listos para dibujar la celda unitaria de nuestra SSF.

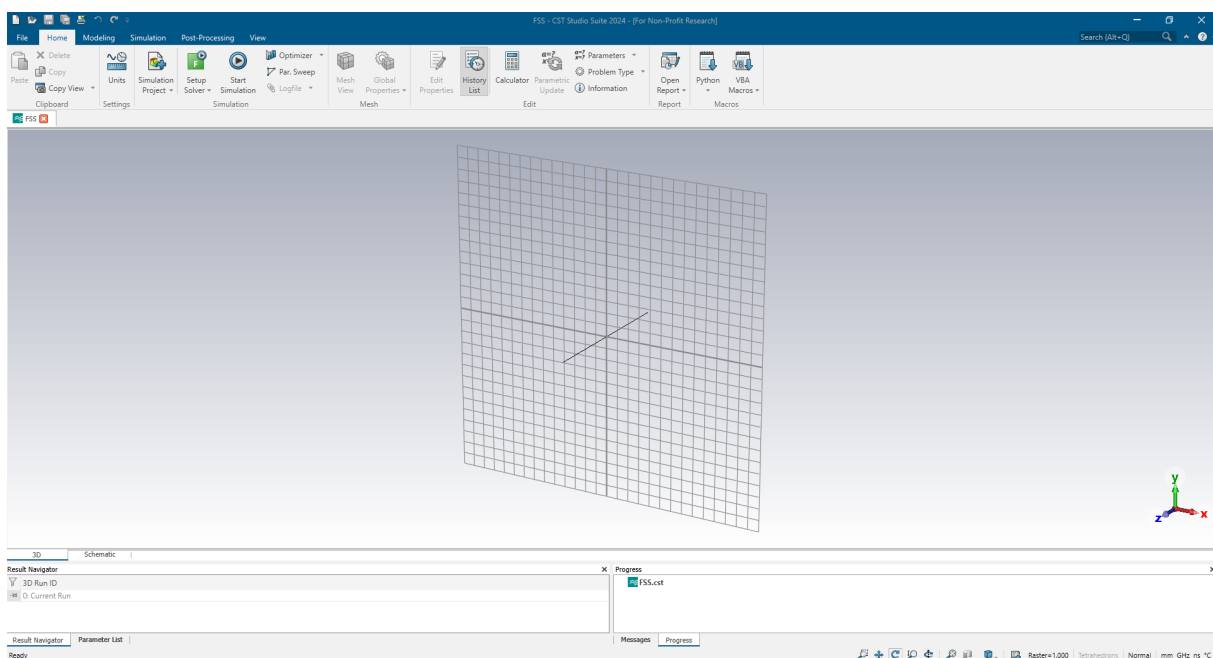


Figura 5.9: Visualización del área de trabajo.

Paso 9. Definición del dieléctrico de la celda unitaria. Es este paso se procede a definir el dieléctrico en términos de dimensiones y materiales. Considerando que queremos desarrollar una celda de un periodo de 10 mm, procedemos a dibujar un sustrato dieléctrico de 10 x 10 mm, con un grosor de 0.230 mm. El material es elegido de una librería que contiene el software. En nuestro caso vamos a utilizar el sustrato Rogers RO4003C.

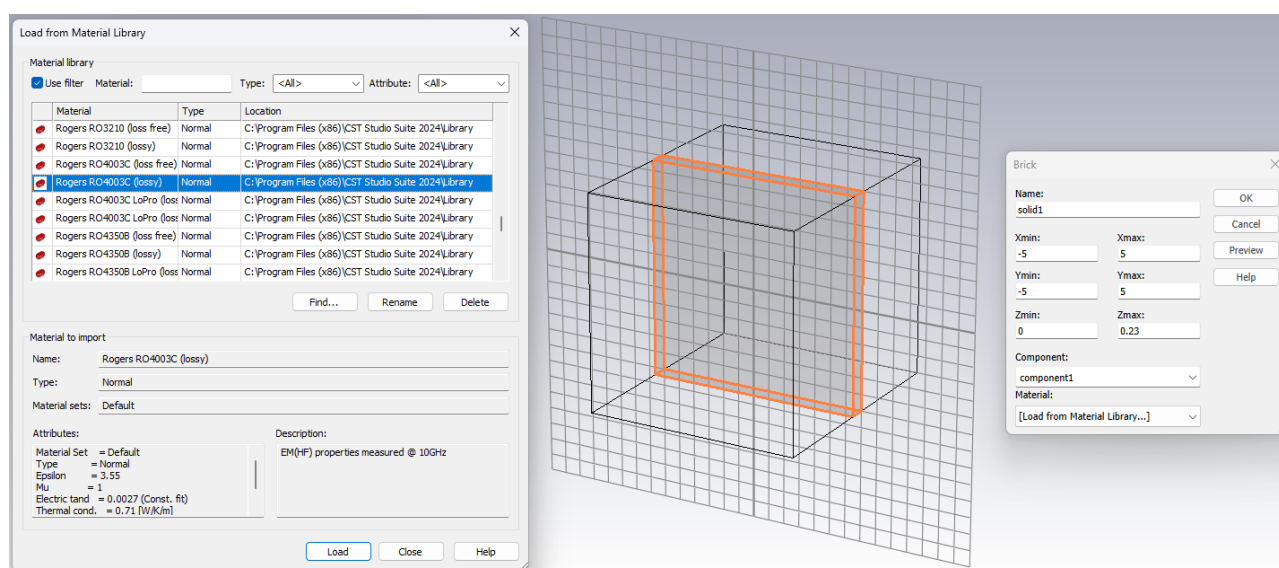


Figura 5.10: Definición del sustrato dieléctrico.

Paso 10. Definición del metal de la celda unitaria. En el caso que se está desarrollando, se trata de una SSF tipo ranura, por lo que será más fácil definir el área de metal sobre el dieléctrico, para posteriormente remover material y formar una ranura con la forma de anillo.

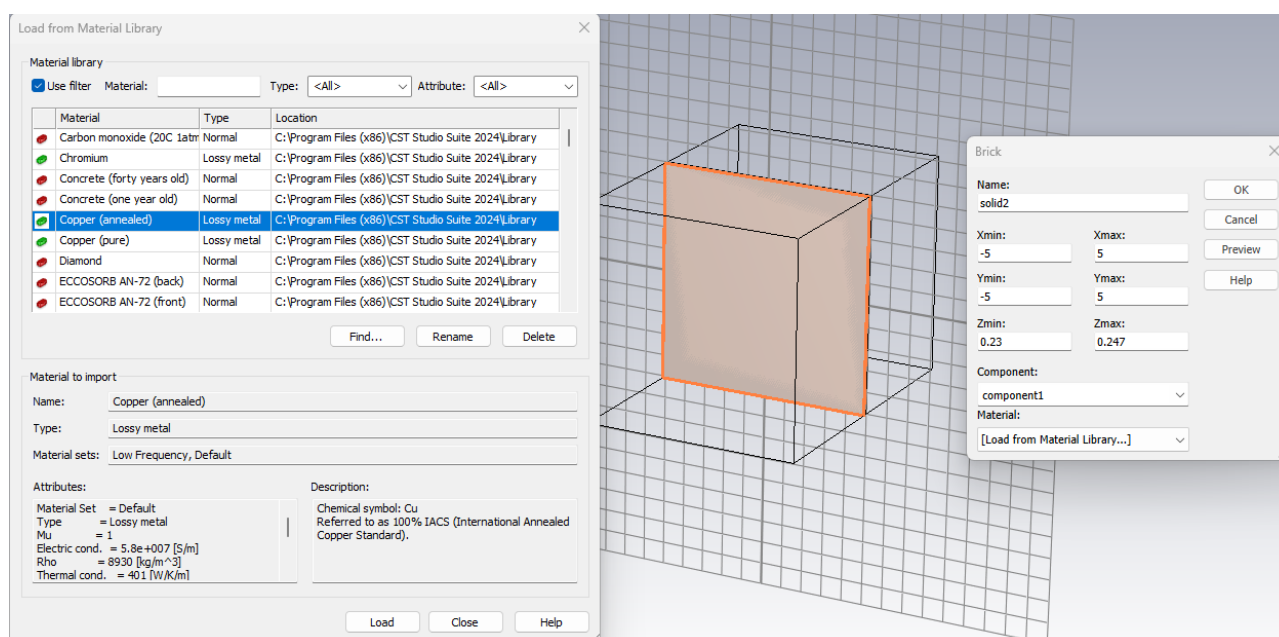


Figura 5.11: Definición del metal.

Paso 11. Definición del anillo que será removido del metal. En este paso se dibuja el anillo con los radios adecuados para posteriormente remover el material metálico.

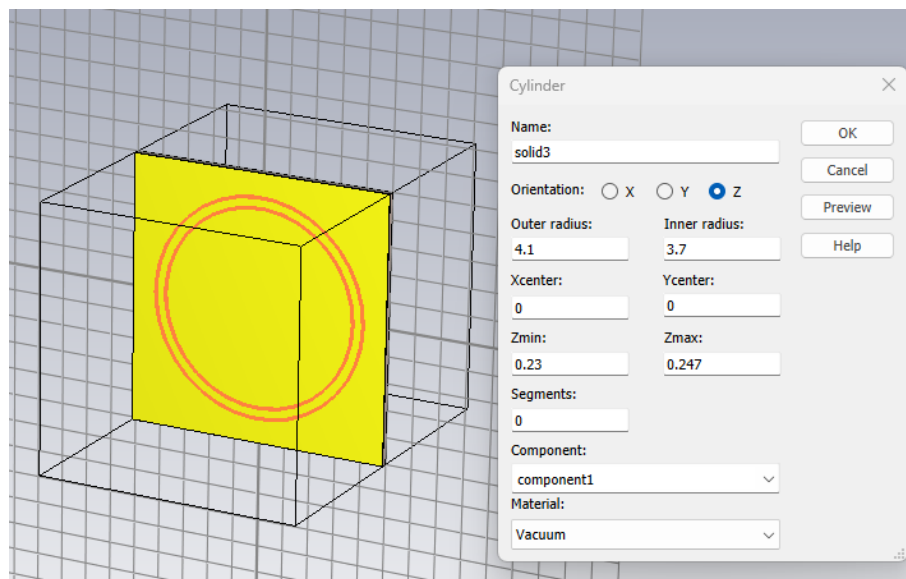


Figura 5.12: Generación del anillo.

Paso 12. Remoción del metal para formar la ranura con forma de anillo. Se selecciona la opción que permite remover la forma del anillo en el metal.

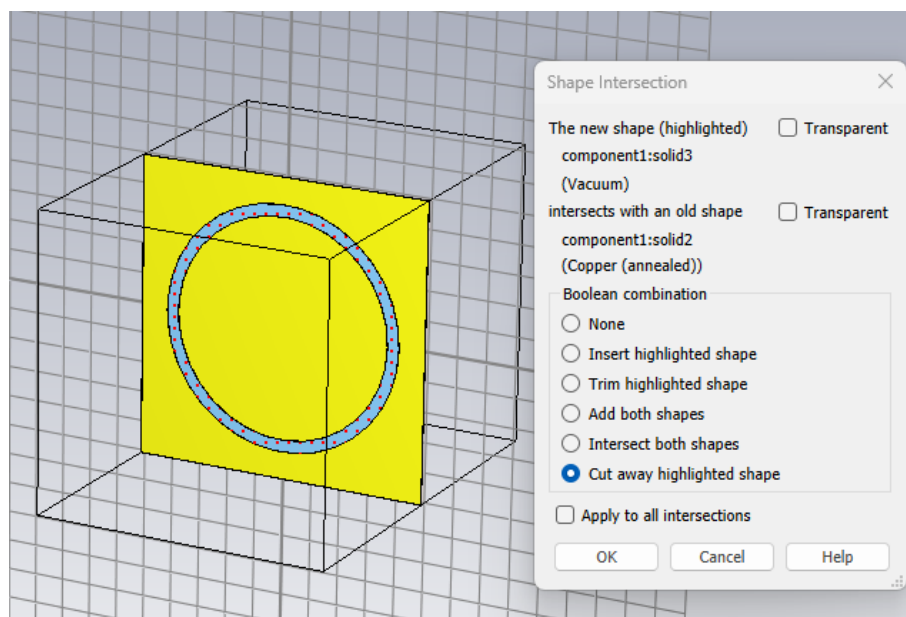


Figura 5.13: Remoción del anillo para formar la ranura.

Paso 13. Definición de las condiciones de frontera. En este paso se definen las condiciones de frontera correspondientes a *unit cell* en los ejes x e y , así como *open (add space)* en el eje z .

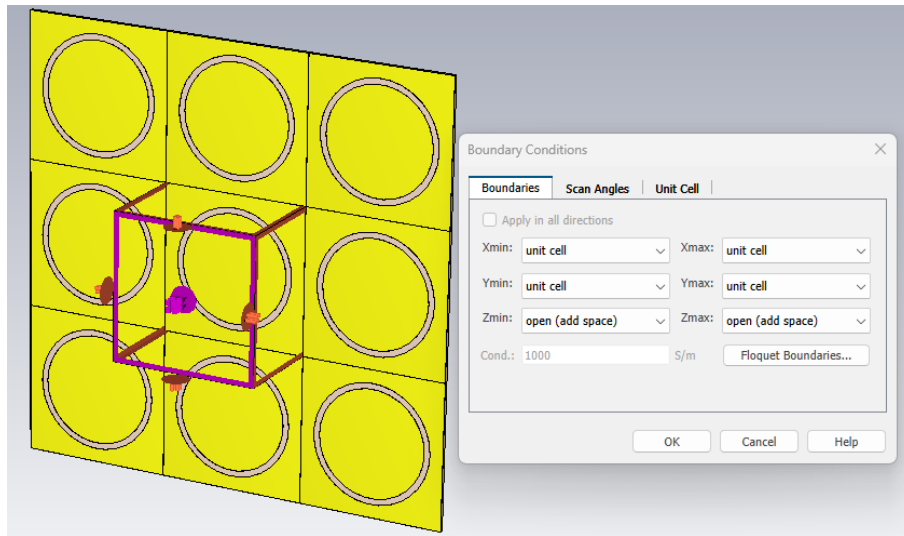


Figura 5.14: Definición de las condiciones de frontera.

Paso 14. Ejecución de la simulación y despliegue de resultados. Finalmente, en este último paso se ejecuta la simulación en el dominio de la frecuencia. Los resultados de la simulación numérica nos proveen los coeficientes de transmisión y reflexión de la FSS:

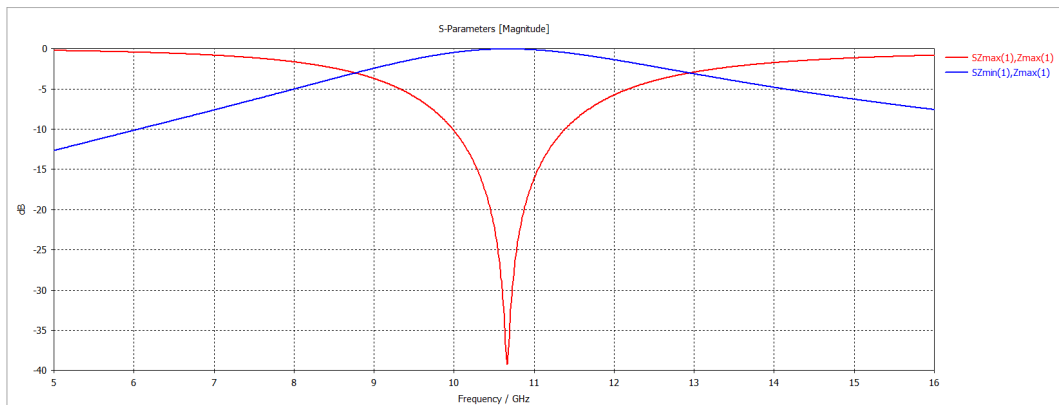


Figura 5.15: Resultados de la simulación numérica.

Tema I Análisis de la simulación de una FSS basada en un anillo ranurado

Los resultados de la simulación numérica muestran las magnitudes de los coeficientes de transmisión y reflexión. Puede observarse una frecuencia de resonancia de 10.67 GHz. Esta respuesta resonante puede ser aproximada por un circuito resonante paralelo en donde las impedancias características de la entrada y la salida es de 377Ω , que corresponde a la impedancia característica del espacio libre. Utilizando el software Advanced Design System (ADS) para el cálculo de los parámetros de dispersión [Technologies, 2024], es posible encontrar los valores

de los elementos R , L y C tal como se muestra en la Figura 5.16. Para este caso los valores optimizados del circuito RLC paralelo que nos brindan un comportamiento similar al que nos entrega el software de onda completa corresponden a $L = 1.09$ nH, $C = 204.5$ fF y $R = 19.5$ k Ω .

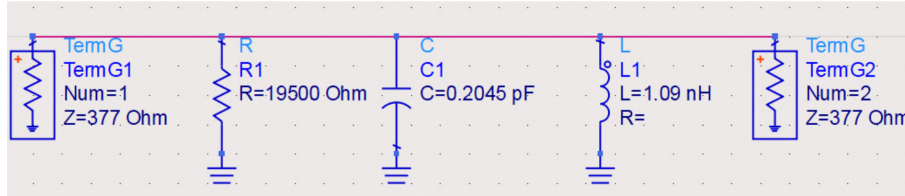


Figura 5.16: Celda unitaria

La comparación de los resultados de la simulación numérica se presentan en la Figura 5.17, puede observarse una gran similitud entre los resultados obtenidos por el método de onda completa y los del circuito equivalente.

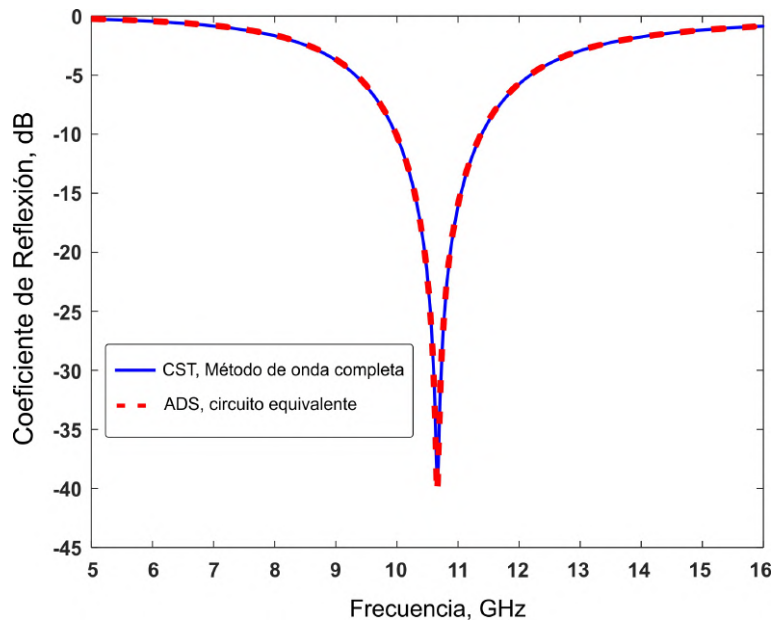


Figura 5.17: Celda unitaria

6

Ejercicios propuestos para circuitos resonantes y FSS

Ejercicios I Circuito resonante serie

Ejercicio 1

Diseñar un circuito resonante serie para una frecuencia de resonancia $f_0 = 10$ MHz y un factor de calidad $Q = 100$. Considerar una resistencia del generador $R_s = 50 \Omega$, una resistencia serie del inductor $r_L = 0.5 \Omega$ y una resistencia de carga $R_L = 100 \Omega$.

Respuesta:

- $L = 239.5 \mu H$
- $C = 1.057$ pF

Ejercicio 2

Encontrar los parámetros (frecuencia de resonancia, factor de calidad y ancho de banda) de circuito resonante serie si cuenta con un inductor de $40 \mu H$, un capacitor de 1 pF, una resistencia de la fuente de 50Ω y una resistencia de carga de 100Ω (Despreciar la resistencia de pérdidas del inductor).

Respuesta:

- $f_0 = 25.16$ MHz
- $Q = 42.02$
- $BW = 0.598$ MHz

Ejercicio 3

Se tiene un circuito resonante serie con una resistencia total de 100Ω , un inductor de $20 \mu H$ y capacitor de 10 pF. Encontrar su función de transferencia y graficarla en MATLAB.

Ejercicios II Circuito resonante paralelo

Ejercicio 1

Analizar y diseñar un circuito resonante paralelo a una frecuencia de resonancia $f_0 = 10 \text{ MHz}$, Factor de calidad $Q=50$ y resistencia de carga $R_L = 50 \Omega$. De igual forma obtener su función de transferencia y graficarla en MATLAB.

Respuesta:

- $C = 15.91 \text{ nF}$
- $L = 15.91 \text{ nH}$

Ejercicio 2

Encontrar los parámetros (frecuencia de resonancia, factor de calidad y ancho de banda) de circuito resonante paralelo si cuenta con un inductor de 50 nH , un capacitor de 12 nF y una resistencia de carga de 50Ω .

Respuesta:

- $f_0 = 6.497 \text{ MHz}$
- $Q = 24.49$
- $BW = 265.26 \text{ kHz}$

Ejercicio 3

Un circuito resonante paralelo con una resistencia total de 50Ω , un inductor de 15 nH y capacitor de 2 nF . Encontrar su función de transferencia y graficar su respuesta en MATLAB.

Ejercicios III Superficies selectivas de frecuencia

Ejercicio 1

Diseñe una superficie tipo anillo ranurado basada en el sustrato Rogers RO4003 con un grosor de 0.5 mm . El periodo de la celda unitario es de 11 mm , el radio interior es de 3.5 mm y el radio exterior es de 4.5 mm .

Ejercicio 2

Simule el campo eléctrico y las corrientes superficiales en la frecuencia de resonancia.

Ejercicio 3

Obtenga un modelo eléctrico equivalente de la FSS.

En este recurso de la Red Universitaria de Aprendizaje (RUA) se han explorado los conceptos básicos de los circuitos resonantes y su relación con las superficies selectivas de frecuencia, destacando cómo el estudio de la resonancia permite el diseño y el desarrollo de tecnologías modernas.

A lo largo del contenido, los estudiantes han comprendido cómo los circuitos resonantes, caracterizados por su capacidad de filtrar señales específicas, forman la base conceptual para el diseño de las FSS. Estas superficies basadas en resonadores, aplican los principios de resonancia para manipular las ondas electromagnéticas de forma precisa, permitiendo aplicaciones avanzadas en las áreas de comunicaciones y metamateriales.

La integración de teoría, simulaciones y aplicaciones prácticas ha facilitado una comprensión profunda y contextualizada de cómo este fenómeno físico se traduce en soluciones innovadoras en ingeniería y ciencia. Además, los ejercicios resueltos y propuestos, así como el desarrollo de un tutorial para el diseño de una FSS basada en el software CST han promovido el aprendizaje activo, permitiendo a los estudiantes desarrollar habilidades para analizar, modelar y diseñar SSF que cumplan con especificaciones requeridas.

Este recurso no solo proporciona una base sólida en resonancia y FSS, sino que también abre la puerta a la exploración de tecnologías emergentes como los metamateriales y la ingeniería de comunicaciones. El estudio de este material equipará a los estudiantes con conocimientos teóricos y prácticos para poder incursionar en el desarrollo de soluciones avanzadas donde la precisión en el manejo de ondas electromagnéticas es cada vez más importante.

Finalmente, se invita a los estudiantes a seguir explorando temas relacionados, como los metamateriales, las metasuperficies y las superficies inteligentes, para continuar profundizando su conocimiento en este apasionante campo de estudio.

Referencias

- Edminister, J. A. (1988). Teoría y problemas de circuitos eléctricos.
- Kim, P. C., Lee, D. G., Seo, I. S., and Kim, G. H. (2008). Nanocomposite stealth radomes with frequency selective surfaces. *Composite Structures*, 86(1):299–305. Fourteenth International Conference on Composite Structures.
- Lazaro, A., Ramos, A., Girbau, D., and Villarino, R. (2013). A novel uwb rfid tag using active frequency selective surface. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 61(3):1155–1165.
- Lee, Y., Kim, S.-J., Park, H., and Lee, B. (2017). Metamaterials and metasurfaces for sensor applications. *Sensors*, 17(8).
- Li, H., Cao, Q., and Wang, Y. (2017). A novel 2-b multifunctional active frequency selective surface for lte-2.1 ghz. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 65(6):3084–3092.
- Munk, B. A. (2005). *Frequency selective surfaces: theory and design*. John Wiley & Sons.
- Rogers Corporation (2021). RO4003C™ Laminates Data Sheet. Accessed: Nov. 28, 2024.
- Seager, R., Chauraya, A., Bowman, J., Broughton, M., Philpott, R., and Nimkulrat, N. (2013). Fabric based frequency selective surfaces using weaving and screen printing. *Electronics Letters*, 49(24):1507–1509.
- Sedra, A. S. and Smith, K. C. (2015). *Microelectronic Circuits*. Oxford University Press, 7th edition.
- So, H., Ando, A., Seki, T., Kawashima, M., and Sugiyama, T. (2013). Directional multi-band antenna employing frequency selective surfaces. *Electronics Letters*, 49(4):243–245.
- Syed, I. S., Ranga, Y., Matekovits, L., Esselle, K. P., and Hay, S. (2014). A single-layer frequency-selective surface for ultrawideband electromagnetic shielding. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 56(6):1404–1411.
- Systèmes, D. (2024). *CST Studio Suite*. Software de simulación electromagnética 3D.
- Technologies, K. (2024). *Advanced Design System (ADS)*. Software de simulación para diseño de circuitos y sistemas RF/microondas.
- The MathWorks, I. (2024). *MATLAB*. Software de cálculo numérico y desarrollo.
- Wu, T.-K. (1995). Frequency selective surfaces. *Encyclopedia RF Microwave Engineering*.