



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Diseño y caracterización de acristalamientos
bajoemisivos con múltiples superficies
selectivas en frecuencia

Design and characterization of low-emissivity
glazing with multiple frequency-selective
surfaces

Autor/es

María Muñoz Molina

Director/es

Íñigo Salinas Áriz

Rocío Chueca Lasheras

Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

Junio 2023

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a Íñigo Salinas y a Rocío Chueca por el respaldo que me habéis brindado durante la realización del trabajo y por ayudarme a descubrir con paciencia cómo realizar un proyecto desde cero.

También quiero agradecer enormemente a todos los amigos que he hecho durante estos últimos años en clase, que sin su apoyo y ayuda no estaría donde estoy hoy en día.

Finalmente, agradecer a mi familia y a aquellos que ya no están, por ser siempre un pilar fundamental y apoyarme en todas mis decisiones.

Resumen

El uso de vidrios bajoemisivos y de control solar en transporte y arquitectura para el aislamiento térmico entre el interior y el exterior supone un problema para las comunicaciones, ya que este tipo de vidrios recubiertos de capas metálicas nanométricas atenúan considerablemente las señales de radiofrecuencia usadas por los móviles.

Una solución a este problema es definir superficies selectivas en frecuencia (FSS) sobre esas capas metálicas, para conseguir que permitan el paso de las señales de telefonía manteniendo las propiedades térmicas del acristalamiento.

Si se necesita un aislamiento térmico grande, el acristalamiento puede contener dos o más superficies metálicas. En este caso es necesario definir FSS en cada una de ellas y, dado el funcionamiento de estas estructuras, no es sencillo predecir el resultado de la interacción entre los distintos elementos que componen la ventana.

Este trabajo consiste en el estudio teórico y experimental de acristalamientos con dos superficies selectivas en frecuencia y en el diseño de configuraciones para conseguir distintos objetivos de transmisión de radiofrecuencia.

Para ello, se ha realizado un estudio teórico del comportamiento a esas frecuencias de un acristalamiento a partir de un modelo equivalente de líneas de transmisión. A partir de ahí, se ha desarrollado un método de simulación y se han fabricado y medido distintos modelos de ventana de interés.

Palabras claves: superficie selectiva en frecuencia (FSS), bajoemisivos, vidrio.

Abstract

The use of low-emissivity and solar control glass in transport and architecture for thermal insulation between the interior and exterior poses a problem for communications, since this type of glass covered with nanometric metal layers attenuates the radiofrequency signals used by the mobiles.

One solution to this problem is to define frequency selective surfaces (FSS) on these metal layers, to ensure that they allow the passage of telephone signals while maintaining the thermal properties of the glazing.

If large thermal insulation is required, the glazing may contain two or more metal surfaces. In this case, it is necessary to define FSS in each of them and, given how these structures work, it is not easy to predict the result of the interaction between the different elements that make up the window.

This work consists of the theoretical and experimental glazing with two frequency-selective surfaces and the design of study configurations to achieve different radiofrequency transmission objectives.

For this, a theoretical study of the behavior at these frequencies of a glazing has been carried out from an equivalent model of transmission lines. From there, a simulation method has been developed and different window models of interest have been manufactured and measured.

Keywords: frequency selective surface (FSS), low-emissivity, glass.

Índice	
Capítulo 1 . Introducción.....	7
1.1 Contexto y Motivación.....	7
1.2 Objetivos	8
1.3 Cronograma	8
1.4 Organización de la memoria	9
Capítulo 2 . Análisis teórico.....	10
2.1 Definición de superficie selectiva en frecuencia (FSS)	10
2.2 Clases de FSS.....	10
2.3 Modelo equivalente de un acristalamiento basado en líneas de transmisión	13
2.4 Incidencia oblicua sobre un acristalamiento con FSS.....	15
Capítulo 3 . Simulación de acristalamientos con FSS.....	16
3.1 Programa diseñado en el entorno de Visual Studio	16
Capítulo 4 . Diseño de las superficies selectivas en frecuencia	19
4.1 Optimización para frecuencias concretas.....	20
4.1 Nulos de atenuación para las principales frecuencias de telefonía móvil	22
4.2 Variación del espesor de las cámaras de aire.....	25
4.3 Comparación de todas las ventanas	26
Capítulo 5 . Resultados experimentales	28
5.1 Método de medida	28
5.2 Medida del índice de refracción del vidrio	29
5.3 Fabricación de los prototipos diseñados	30
5.4 Medidas y comparación con las simulaciones.....	33
Capítulo 6 . Conclusiones y líneas futuras	37
Bibliografía	38
Anexo 1. Código Visual Studio	39
Anexo 2. Código MATLAB	47

Capítulo 1. Introducción

1.1 Contexto y Motivación

La utilización de vidrios con propiedades térmicas (tanto bajo emisivos como de control solar) es cada vez más frecuente tanto en arquitectura como en transporte. Estos vidrios se caracterizan bien porque su coeficiente de transmisión en el espectro infrarrojo es muy inferior al de los vidrios convencionales (vidrios de control solar) o porque su emisividad en ese espectro infrarrojo es muy baja, para no radiar calor al interior o al exterior de un habitáculo (vidrios bajoemisivos). Ambos efectos se consiguen mediante la deposición de una o varias capas metálicas.

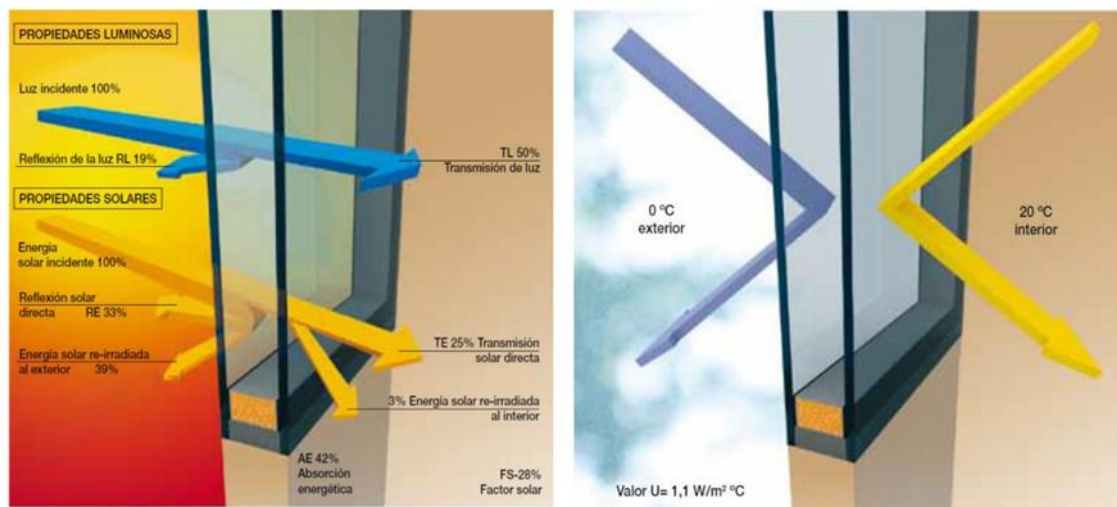


Figura 1.1. Ejemplo de vidrio con propiedades térmicas

Sin embargo, la incorporación de estos compuestos metálicos hace que los vidrios también dejen de ser transparentes para las ondas electromagnéticas utilizadas habitualmente en tecnologías de comunicación inalámbricas como telefonía móvil o WiFi, cuyas frecuencias son del orden de los gigahercios. En esta región del espectro las multicapas empleadas para control de propiedades térmicas pueden producir aumentos en la atenuación de la señal del orden de 30-40 dB, que frecuentemente serán excesivos para las prestaciones del enlace inalámbrico y producirán la pérdida de cobertura en el interior de un edificio con grandes acristalamientos o de un vehículo metálico.

Una solución a este problema son las superficies selectivas en frecuencia (FSS, *Frequency Selective Surface*). Se trata de superficies, normalmente metálicas, con patrones periódicos diseñados para transmitir, reflejar o absorber ondas electromagnéticas de un rango de frecuencias determinado. Si se definen patrones de este tipo en las capas metálicas de los vidrios bajoemisivos o de control solar, pueden crearse ventanas de transmisión en las zonas del espectro de interés para comunicaciones, a costa de una pérdida de eficiencia de los recubrimientos proporcional al área de capa metálica retirada.

El Grupo de Tecnologías Fotónicas (GTF) del I3A ha trabajado recientemente en el desarrollo de FSS mediante grabado con láser para ventanas de ferrocarril con la empresa Ariño Duglass (proyecto RTC-2017-6504-5: Innovación y desarrollo de vidrios

antipolución con superficies selectivas en frecuencia-FOTOFREC). Los resultados de este proyecto han permitido a la empresa comercializar un nuevo producto utilizando el conocimiento obtenido y han motivado la adquisición por su parte de una máquina de grabado láser, que podrá utilizarse para la fabricación de los prototipos diseñados en el trabajo propuesto en esta memoria.

Algunos acristalamientos de mayores prestaciones incorporan más de una capa bajoemisiva (normalmente dos o tres). Si se definen FSS sobre todas las capas, al estar éstas situadas en diferentes facetas de los vidrios que componen la ventana, las separaciones ente ellas pueden estar en el orden de las longitudes de onda de las señales de interés, con lo que el efecto conjunto de las diferentes FSS puede diferir mucho del que se obtenía con una sola superficie selectiva.

El trabajo que se plantea consiste en el diseño y caracterización de acristalamientos de este tipo, en los que la presencia de más de una superficie con capa metálica exige la definición de múltiples FSS.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es el estudio de la atenuación de la señal a través de vidrios con propiedades térmicas y múltiples superficies selectivas en frecuencia.

Este objetivo se puede dividir en los siguientes objetivos parciales:

- Estudio teórico del comportamiento de acristalamientos con múltiples superficies selectivas en frecuencia a partir de un modelo equivalente de líneas de transmisión.
- Diseño de la combinación más adecuada de FSS con estructuras de acristalamiento convencionales para lograr las propiedades deseadas de transmisión de señales de radiofrecuencia.
- Caracterización experimental de los prototipos de ventana fabricados a partir de los diseños realizados previamente. Verificación de la capacidad de predicción del método de diseño.

1.3 Cronograma

A continuación, se muestra la distribución del trabajo realizado entre los meses de enero y mayo en el siguiente diagrama de GANTT:

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Análisis teórico	■				
Programación		■			
Diseño		■			
Mediciones	■				■
Memoria					■

1.4 Organización de la memoria

En el capítulo 2 se va a exponer la teoría a partir de la cual hemos creado nuestro programa de simulación y a partir de la que se ha entendido qué son las superficies selectivas en frecuencia.

Posteriormente, en el capítulo 3, se comentará el funcionamiento de los distintos programas que se utilizarán para la representación de la atenuación de acristalamientos con dos vidrios con propiedades térmicas y FSS.

Seguidamente, en el capítulo 4, se realizará el diseño de distintas ventanas con dos FSS utilizando los programas creados previamente. En el capítulo 5 se elegirán varias de ellas y se fabricarán para comprobar que los resultados de las simulaciones se ajustan a las medidas experimentales. Así se demostrará que estas simulaciones pueden ser utilizadas para prever cuanta señal atraviesa nuestros vidrios y cuanta se atenúa para distintas frecuencias.

Finalmente se expondrán las conclusiones y la bibliografía.

Capítulo 2. Análisis teórico

2.1 Definición de superficie selectiva en frecuencia (FSS)

Las superficies selectivas en frecuencia (FSS, *Frequency Selective Surface*) son estructuras, repetidas periódicamente y normalmente metálicas, diseñadas para reflejar, transmitir o absorber campos electromagnéticos [1]. Esta forma periódica es la que produce un comportamiento frecuencial determinado [2]. Habitualmente, son utilizadas como filtros para el rango de frecuencias de las microondas (300MHz y 30 GHz). Para obtener dicho filtro, se trazan líneas o formas geométricas en la capa metálica con una dimensión menor que la longitud de onda.

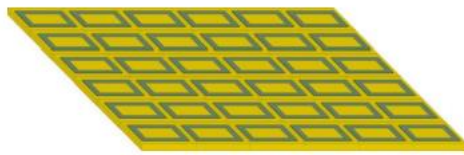


Figura 2.1. Superficie selectiva en frecuencia

El estudio de las superficies selectivas en frecuencia comienza a mediados de 1970, especialmente para aplicaciones militares, industriales y científicas, en un rango electromagnético que se extiende desde el infrarrojo hasta las microondas.

Sus principales aplicaciones fueron como filtros banda eliminada, empleadas como radomos para antenas situadas en aviones o embarcadas en buques.

En los últimos años han ido adquiriendo importancia en aplicaciones como subreflectores dicróicos para reflectores parabólicos, pantallas absorbentes de banda ancha y polarizadores lineales o circulares.

Con la progresión de los años y ante la necesidad de nuevas aplicaciones, se fueron introduciendo nuevas estructuras como elementos resonantes, permitiendo introducir otros tipos de filtrados, como puede ser el paso banda o el banda eliminada.[3]

Hoy en día pueden ser utilizadas en vidrios con propiedades térmicas para aplicaciones arquitectónicas y de transporte, como es nuestro caso.

2.2 Clases de FSS

La forma y tamaño de la estructura periódica define sus características como filtro. Hay muchos tipos de FSS, pero los más sencillos son los compuestos mediante líneas rectas. A continuación, se describen algunos de ellos [4].

2.2.1 Filtro tipo rejilla

La geometría del filtro tipo rejilla se muestra en la Figura 2.2. Se encuentra formado por dos tipos de tiras: tiras metálicas rectas y tiras rectas en las que se ha eliminado la capa metálica. Este tipo de filtro puede ser inductivo o capacitivo dependiendo de la dirección del campo eléctrico con respecto a las tiras de metal.

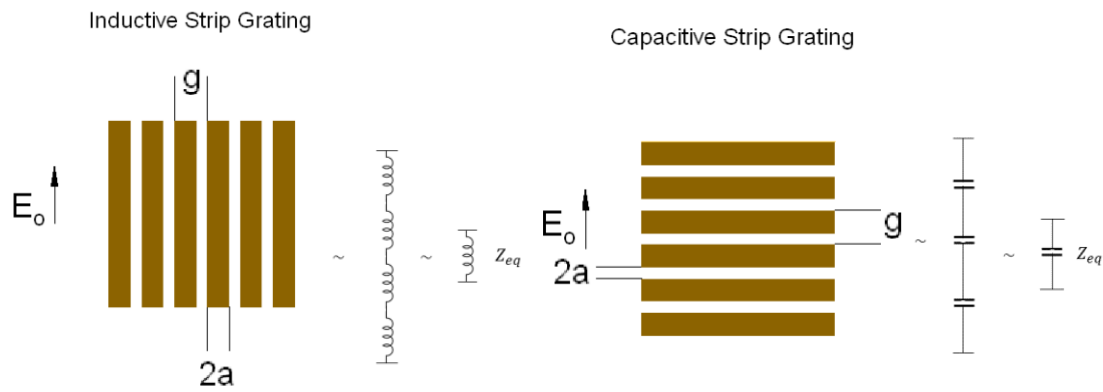


Figura 2.2. Filtro tipo rejilla a) inductivo b) capacitivo

Cuando el campo eléctrico es paralelo a las tiras se tiene un filtro inductivo tipo rejilla [4]. Cada conductor de anchura determinada se ve como un conjunto de bobinas en serie, lo cual producirá un comportamiento de filtro paso alto cuyo circuito equivalente se encuentra en Figura 2.2a. La frecuencia de corte de este filtro depende del grosor de las franjas metálicas y su periodicidad.[5]

Por otro lado, también podemos encontrar que el campo eléctrico es perpendicular a la tira del metal tenemos un filtro capacitivo tipo rejilla [4]. Los huecos entre los conductores producen capacitancias. Es por esto por lo que la rejilla capacitiva es vista como un filtro paso bajo cuyo circuito equivalente se muestra en la Figura 2.3. Con respecto a su frecuencia de corte, debido a que las capacitancias se forman en los huecos, ésta se calcula con la anchura de los huecos y la periodicidad de las franjas.[5]

Cuanto más estrecho es el hueco entre los conductores, mayor será el valor del condensador equivalente y, cuanto más ancho el conductor, mayor será el valor de la bobina.

Sin embargo, para el caso de longitudes de onda extremadamente pequeñas, del orden del infrarrojo (a partir de los 780nm), la onda se refleja en las zonas metálicas y se transmite en las zonas de vidrio, por tanto, el porcentaje de potencia que se transmite es prácticamente igual al porcentaje de superficie del vidrio en la que no hay capa metálica.[5]

2.2.2 Filtro tipo malla

Las estructuras anteriores funcionan solamente para una polarización, por lo que para obtener un comportamiento independiente de la polarización deberemos definir filtros tipo malla. El filtro tipo malla capacitivo consiste en una rejilla de cuadrados metálicos mientras que la malla inductiva representa la estructura complementaria.

Estos filtros se van a comportan como filtros paso alto y paso bajo, como se puede comprobar en la Figura 2.3, donde se muestra el equivalente circuital de cada una de las mallas. En este caso la transmitancia a través del filtro es independiente de la polarización de la fuente. Esto quiere decir que ambas componentes de polarización tienen los mismos coeficientes de transmisión y reflexión, y por lo tanto el coeficiente de transmisión no está en función del ángulo de polarización. Por esto, hemos elegido dicho modelo para realizar nuestras ventanas.[4]

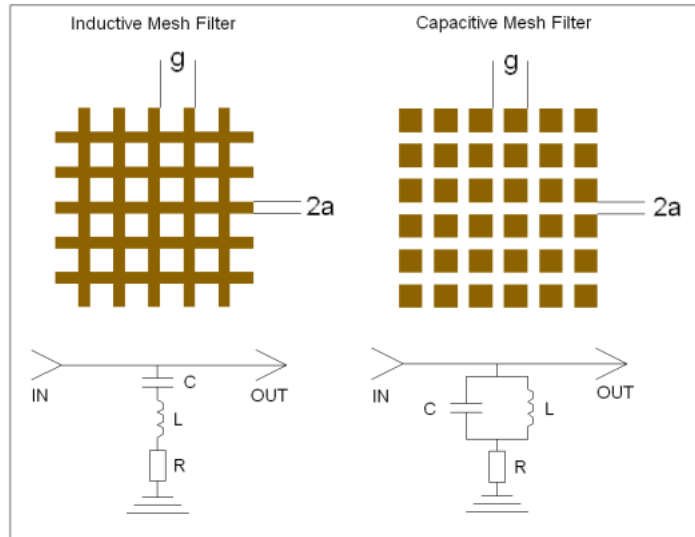


Figura 2.3. Filtro tipo malla a) inductivo (paso alto) b) capacitivo(paso bajo)

Además de estos filtros también existen los filtros tipo cruz Figura 2.4 c y d. Estos filtros son similares a los filtros tipo malla excepto que ahora en vez de repetirse periódicamente un cuadrado se repetirán cruces. Los mismos principios discutidos en las dos secciones anteriores se aplican a la geometría de malla cruzada. La característica más importante de estos filtros es que pueden ser usados como filtros de banda de paso y banda eliminada.[4]

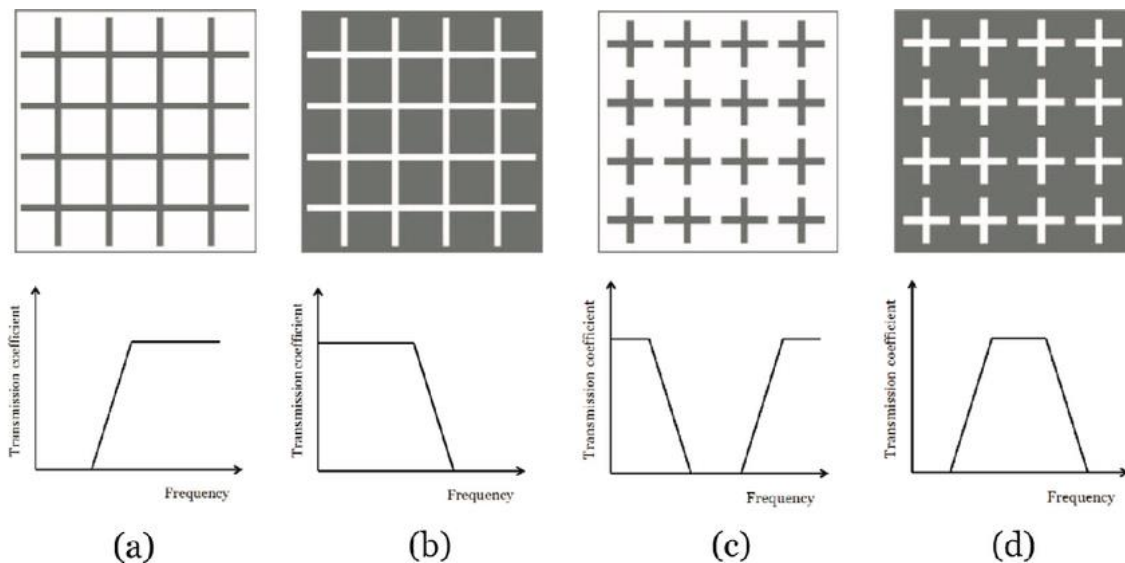


Figura 2.4. Filtro tipo malla:(a) paso alto; (b)paso bajo; Filtro tipo cruz:(c) banda eliminada; and (d) paso banda[8].

De todos los modelos mencionados anteriormente, en este proyecto se han utilizado elementos rectangulares, líneas horizontales y verticales que han sido eliminadas mediante láser de la capa metálica (Figura 2.3 b y Figura 2.4 b). Este es el tipo de FSS que se ha escogido debido a que se retira poca capa metálica, que en esta aplicación será un factor importante ya que a menor capa retirada mayor aislamiento habrá entre el interior y el exterior de un habitáculo. En la Figura 2.5 podemos ver un ejemplo del filtro tipo malla que se va a utilizar cuya capa metálica se puede observar en gris y la

capa eliminada con el láser en blanco (FSS). Además, hay que destacar que este tipo de FSS tiene comportamiento de filtro paso bajo y por eso se ha elegido, ya que para dejar pasar las señales de radio frecuencia y que la luz que la atraviese no se vea afectada será necesario un filtro paso bajo.

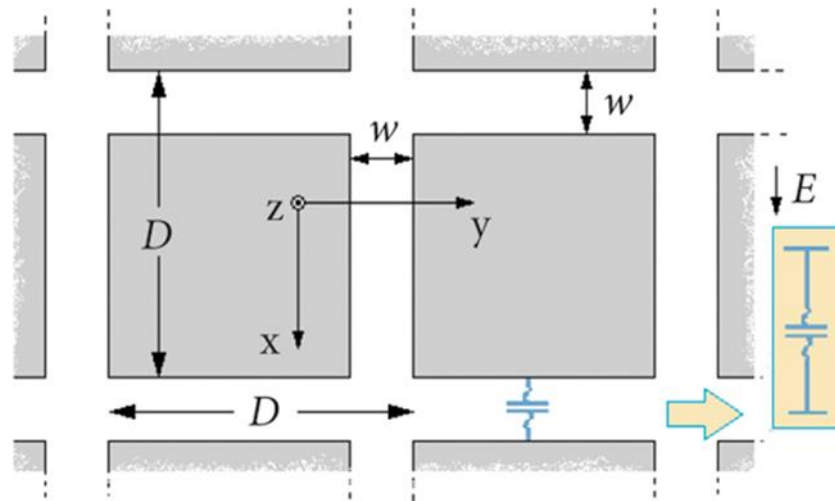


Figura 2.5. Dibujo esquemático de la FSS con líneas horizontales y verticales de periodicidad D y grosor w

2.3 Modelo equivalente de un acristalamiento basado en líneas de transmisión

Una ventana está formada por varias capas de vidrio y aire. En la Figura 2.6 se puede observar un ejemplo de la composición de estas ventanas, en este caso está formada por dos capas de vidrio y entre ellas una de aire de distintos espesores (d_v y d_a).

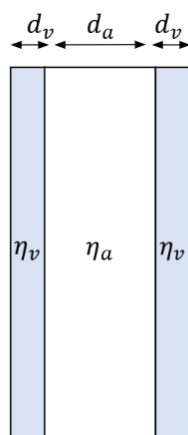


Figura 2.6. Ejemplo de capas que forman una ventana

Las dimensiones son comparables a las longitudes de onda de las señales utilizadas, por lo que habrá efectos de interferencia entre las ondas planas que se reflejan y transmiten entre las distintas superficies.

Estas interferencias pueden estudiarse sustituyendo la multicapa por un modelo equivalente de líneas de transmisión, en el que cada capa es una línea de transmisión

con una longitud igual al espesor de la capa, y una impedancia igual a la impedancia intrínseca del medio (Figura 2.7).

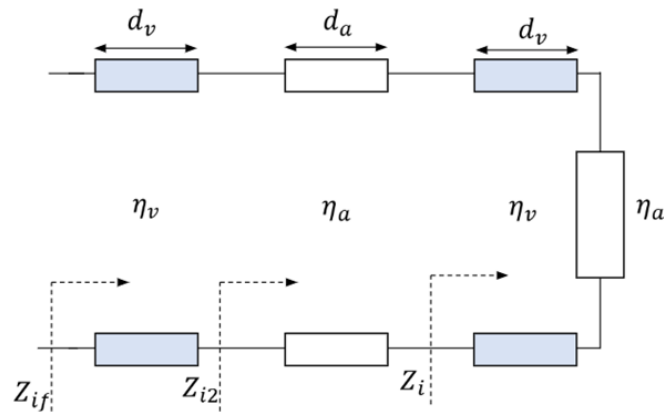


Figura 2.7. Equivalente en líneas de transmisión de la ventana del ejemplo anterior

La impedancia de entrada Z_i de un tramo de línea de transmisión se calcula con la expresión (1), donde Z_L es la impedancia de carga, R_0 la impedancia de la línea de transmisión y βl la longitud eléctrica de la línea [6].

$$Z_i = \frac{Z_L + jR_0 \tan \beta l}{R_0 + jZ_L \tan \beta l} = \frac{\eta_a + j\eta_v \tan \beta d_v}{\eta_v + j\eta_a \tan \beta d_v} \quad (1)$$

Esta expresión será recursivamente usada para las distintas líneas de transmisión. Finalmente se obtendrá la impedancia de entrada equivalente del circuito completo (Z_{if}). A partir de la potencia P_{in} entregada por el generador a esa impedancia (y por tanto a la carga, P_L , ya que se consideran líneas sin pérdidas) es posible calcular el coeficiente de transmisión y la atenuación del circuito (y del acristalamiento):

$$P_{gen} = \frac{|V|^2}{4Z_g} \quad P_L = P_{in} = V_{in} \cdot I_{in}^* = |V|^2 \operatorname{Re} \left[\frac{Z_{if}}{Z_{if} + Z_g} \left(\frac{1}{Z_{if} + Z_g} \right)^* \right] \quad (2)$$

$$T = \frac{P_L}{P_{gen}} \quad (3)$$

$$At(dB) = -10 \log(T) \quad (4)$$

En este modelo circuital es sencillo introducir una o varias FSS, pues basta con representar su impedancia equivalente como una carga en paralelo en el punto del acristalamiento en el que se encuentre la capa metálica sobre la que se ha definido la FSS (en naranja en la Figura 2.8).

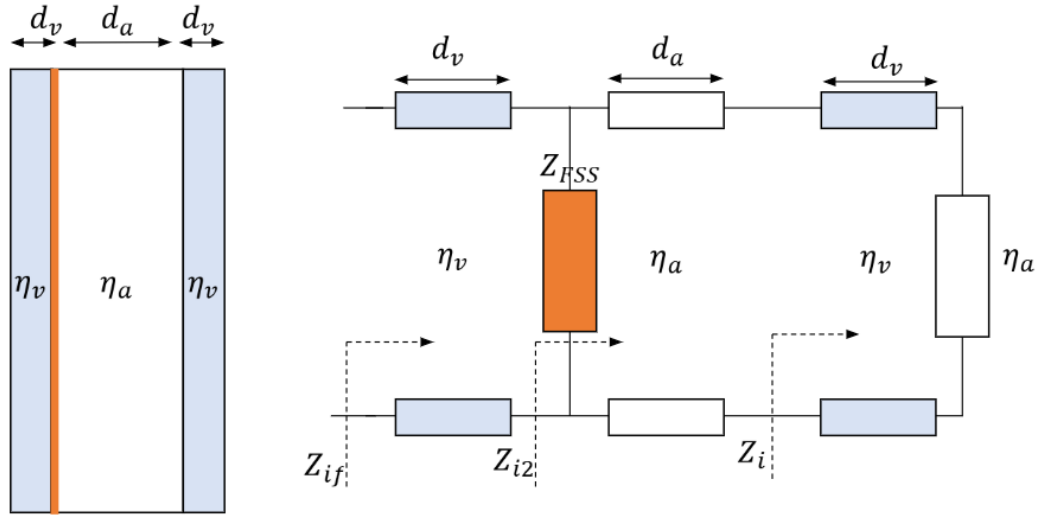


Figura 2.8. Ventana del ejemplo anterior añadiendo una FSS

Como se ha comentado previamente, en este proyecto se van a utilizar FSS de tipo malla capacitiva, con comportamiento de filtro paso bajo y cuyo equivalente es un condensador. La capacidad de dicho condensador puede calcularse con la expresión (5), en la que D es la periodicidad de la FSS, w el grosor de la línea, ϵ_0 es la permitividad del vacío y ϵ_{r1} y ϵ_{r2} son las permitividades relativas de los medios anterior y posterior a la FSS.[7]

$$C_{FSS} = \frac{D\epsilon_0(\epsilon_{r1} + \epsilon_{r2})}{\pi} \ln\left(\frac{1}{\sin\left(\frac{\pi w}{2D}\right)}\right) \quad (5)$$

$$Z_{FSS} = X_{CFSS} = \frac{1}{2\pi f C_{FSS}} \quad (6)$$

2.4 Incidencia oblicua sobre un acristalamiento con FSS

El modelo mencionado anteriormente es válido solo para incidencia normal, pero puede ser modificado para incluir distintos ángulos de incidencia.

Si definimos las ondas TE como aquellas con un campo eléctrico(E) perpendicular al plano de incidencia (polarización perpendicular), y las ondas TM como aquellas cuyo campo eléctrico(E) está en el plano de incidencia (polarización paralela), las impedancias de las capas dieléctricas pueden ser reemplazadas considerando el ángulo de incidencia por sus impedancias equivalentes [6].

$$Z^{TE} = \frac{\eta}{\cos\theta} \quad (7)$$

$$Z^{TM} = \eta \cdot \cos\theta \quad (8)$$

Además, para el cálculo de la impedancia de la FSS, en el caso de polarización perpendicular (TE), es necesario añadir un término corrector a la ecuación [7]:

$$C_{FSS}(\theta) = C_{FSS} * \left(\frac{1 - \sin^2 \theta}{\epsilon_{r1} + \epsilon_{r2}}\right) \quad (9)$$

Capítulo 3. Simulación de acristalamientos con FSS

En esta sección se va a introducir el programa que, utilizando el modelo de líneas de transmisión descrito previamente, permite calcular la atenuación de los acristalamientos bajoemisivos con dos superficies selectivas en frecuencia.

3.1 Programa diseñado en el entorno de Visual Studio

El modelo equivalente de líneas de transmisión estaba implementado previamente en Matlab, pero sólo el caso de ventanas con una única FSS. El programa anterior se ha adaptado al lenguaje C# y en el entorno Visual Studio, y además se ha modificado para poder incluir dos superficies selectivas en frecuencia (Ver Anexo 1).

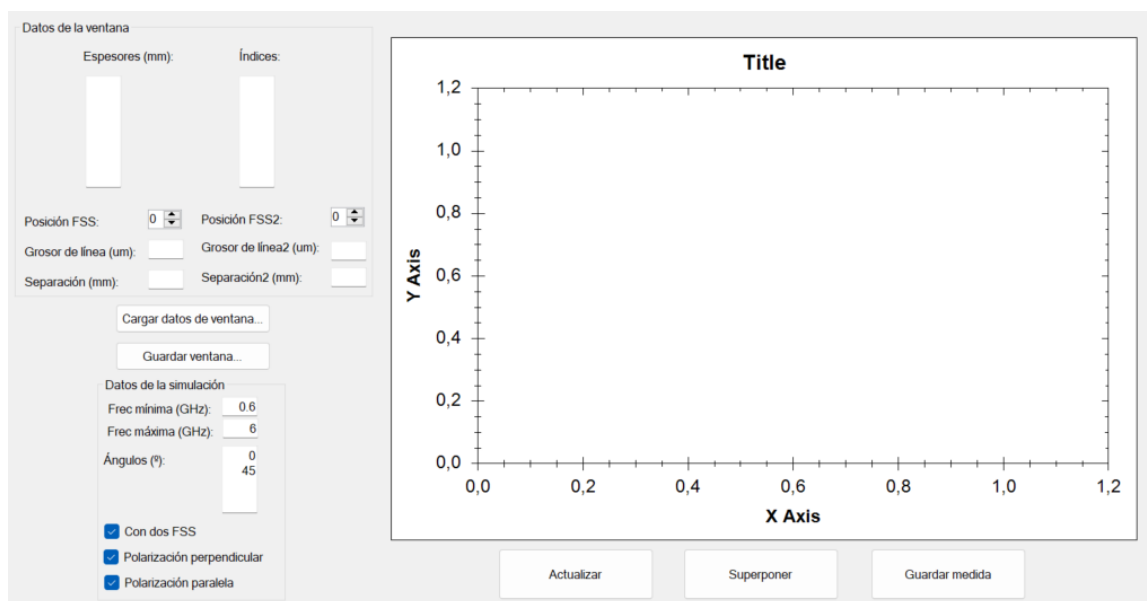


Figura 3. 1. Ventana completa del programa de simulación

La ventana principal del programa se muestra en la Figura 3. 1. Está dividida en tres secciones, que se comentan a continuación:

La primera sección (Figura 3 .2) estará formada por todos los datos que caracterizan a las distintas capas que forman la ventana:

- Los **espesores** de cada capa: normalmente utilizaremos capas de vidrio y aire intercaladas. El espesor de los vidrios será de unos 3-5mm y el de las cámaras de aire o gas de unos 12-15mm.
- Estas capas tendrán distintos **índices de refracción** (1 para las capas de aire y en torno a 2.5-2.7 para los vidrios).
- Se definen los valores relacionados con la geometría de las superficies selectivas en frecuencia (**FSS**), estos valores incluyen (Figura 3 .2):
 - La posición de la FSS, la cual indica donde se encuentra cada una de las FSS dentro de la estructura multicapa (normalmente después de cada vidrio)
 - El grosor (w).
 - Y la distancia entre los distintos cuadrados que componen la FSS (D), también llamada periodicidad de la FSS.

De la misma manera se definen los valores relacionados con la segunda FSS.

The image shows two panels of a software interface. The left panel, titled 'Datos de la ventana', contains input fields for 'Espesores (mm)', 'Índices', 'Posición FSS', 'Posición FSS2', 'Grosor de línea (um)', 'Grosor de línea2 (um)', 'Separación (mm)', and 'Separación2 (mm)'. The right panel, titled 'Datos de la simulación', includes buttons for 'Cargar datos de ventana...' and 'Guardar ventana...', and input fields for 'Frec mínima (GHz)' (0.6), 'Frec máxima (GHz)' (6), and 'Ángulos (°)' (0 and 45). It also features three checked checkboxes: 'Con dos FSS', 'Polarización perpendicular', and 'Polarización paralela'.

Figura 3.2. Configuración de los datos de la ventana y de la simulación

En esta segunda sección de la figura 3.2 se pueden establecer los rangos de frecuencia máximo y mínimo y los ángulos de incidencia para realizar los cálculos. Se utilizará habitualmente un rango de frecuencia entre los 600MHz y 6GHz ya que es el más adecuado para el sistema de medida del que se dispone.

Por otro lado, se podrá indicar también cual es el ángulo de incidencia de la señal con respecto a la ventana y si se utiliza polarización paralela o perpendicular.

También se puede realizar el cálculo sin capas metálicas ni FSS, o solamente con una FSS.

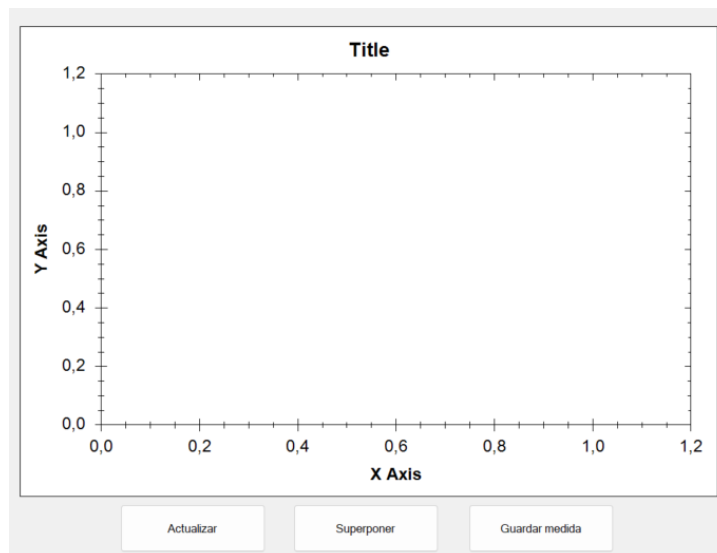


Figura 3.3. Representación de los resultados

El objetivo del programa es realizar la representación de los resultados a partir de los datos introducidos anteriormente, dicha representación se realizará basándonos en el capítulo 1: Análisis teórico, y fundamentalmente servirá para que la empresa a la que va

dirigida este proyecto pueda utilizar el programa sin necesidad de saber cómo funciona el código.

Lo más probable es que se tengan marcadas las tres casillas de la Figura 3.3 y varios ángulos de incidencia si es así ocurrirá lo siguiente:

Para cada ángulo y cada una de las frecuencias que se han definido en la Figura 3.3 se van a realizar varios cálculos:

1. Se calcula la impedancia de entrada para cada línea de transmisión con la fórmula (1) hasta llegar a la FSS en la que utilizaremos las fórmulas (5) y (6). Ambos pasos se repetirán hasta obtener la impedancia de entrada del circuito.
2. Cuando se obtenga se procederá al cálculo de los coeficientes de reflexión y de transmisión y la atenuación de la ventana mediante las fórmulas (2),(3) y (4). La atenuación será lo que finalmente representemos en las gráficas.

Ambos pasos se realizarán dos veces una para polarización horizontal y otra perpendicular que dependiendo de una u otra la impedancia de entrada se multiplicará o dividirá por un coseno. Ecuaciones (7) y (8).

Finalmente se observarán los resultados gráficamente en la ventana de la Figura 3. 3 representando la atenuación (eje y) para las distintas frecuencias en las que se haya acotado la representación.

Si se desea realizar una nueva representación simplemente se introducirán los nuevos datos de la ventana y se presiona el botón de actualizar. Si por lo contrario se desea una nueva representación, pero manteniendo la anterior para comparar ambas gráficas, se deberá presionar el botón superponer y así no se borrará la gráfica realizada previamente. Para guardar los datos de los resultados obtenidos simplemente habrá que guardar la medida.

Es importante recalcar que el programa base estaba formado por una única FSS, pero ha sido modificado para que el cálculo se realice con dos incluyendo los botones necesarios en la ventana de la Figura 3. 1 .Se ha basado en la misma base teórica que para una FSS, solo que había que tener en cuenta que la impedancia de entrada se debía calcular en dos tramos, el primer tramo hasta el primer condensador (primera FSS) y el segundo tramo hasta el segundo condensador (segunda FSS). Además, también se distinguía del programa base en que el coeficiente de transmisión no se calcula con la fórmula general ($T = 1 - |\Gamma|^2$), sino con una específica (fórmula (3)) que depende de dos ratios, uno que corresponde a las pérdidas de la primera FSS y el segundo a las de la segunda FSS. Finalmente, se ha introducido el botón de superponer (Figura 3. 3) para así conseguir ver varias gráficas a la vez.

Capítulo 4. Diseño de las superficies selectivas en frecuencia

En este capítulo el objetivo principal es el diseño de la combinación más adecuada de FSS con estructuras de acristalamiento convencionales para lograr las propiedades deseadas de transmisión de señales de radiofrecuencia.

Se van a utilizar ventanas formadas por triple acristalamiento de vidrio y doble cámara de aire como se muestra en la Figura 4. 1. Cada capa puede tener diferente grosor (longitud) e impedancia. En nuestro caso utilizaremos dos tipos de capas, capas de vidrio con un grosor(d_v) de 4mm y de aire de un grosor (d_a) de 14 mm. Además, se utilizarán dos FSS después de las dos primeras capas de vidrio (en naranja en la Figura 4. 1.)

Utilizando el modelo de líneas de transmisión descrito previamente, se define la ventana como una serie de líneas de transmisión de diferentes impedancias (Figura 4. 2). A partir de este modelo podremos obtener la atenuación de la señal al atravesar dicha ventana.

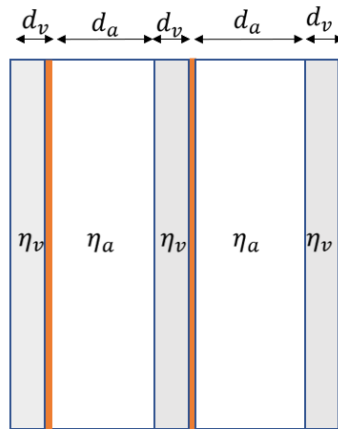


Figura 4. 1. Modelo multicapa

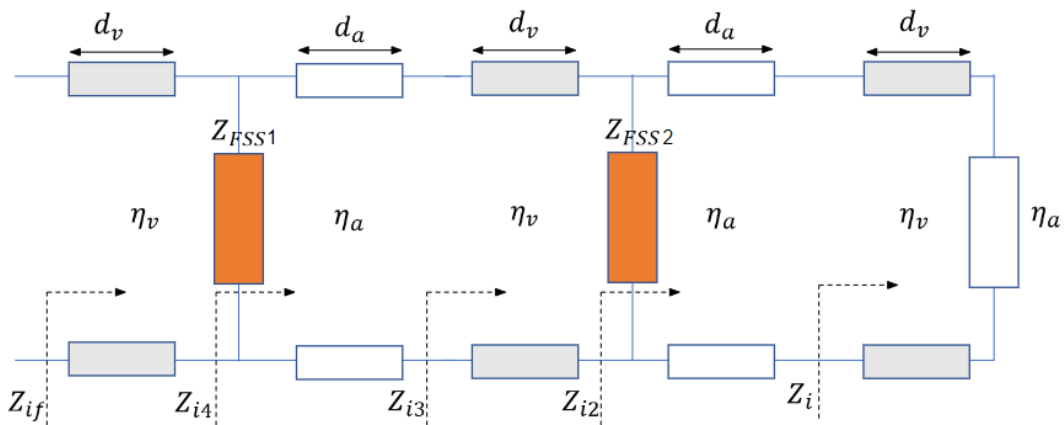


Figura 4. 2. Equivalente circuital del modelo multicapa

Como se ha mencionado anteriormente, el índice de refracción de los vidrios utilizados está en el intervalo 2.5-2.7. Para obtener un valor más preciso, se caracterizó experimentalmente una muestra de vidrio, como se describirá en el apartado 5.2. De ahí se obtuvo un índice de refracción de 2.65, que es el que se ha usado en este proyecto.

En el programa de simulación se introducirán los espesores e índices de las capas que componen la ventana, así como la posición en la que se encuentra la FSS. Al estar la primera FSS después del primer vidrio la posición de la FSS será la 0, ya que empezando por la izquierda hasta la derecha el primer vidrio corresponde con la posición cero. Así mismo la segunda FSS, al encontrarse después del segundo vidrio y una capa de aire estará en la posición 2.

En las simulaciones realizadas, se ha fijado el grosor de línea a $100\mu\text{m}$ y el rango de frecuencias de 600 a 6000 MHz.

The screenshot shows a software interface titled "Datos de la ventana" (Window Data) and "Datos de la simulación" (Simulation Data). The "Datos de la ventana" section includes two columns: "Espesores (mm)" and "Índices". The "Espesores (mm)" column contains the values 4, 14, 4, 14, and 4. The "Índices" column contains the values 2.65, 1, 2.65, 1, and 2.65. Below these columns are input fields for "Posición FSS:" (set to 0), "Posición FSS2:" (set to 2), "Grosor de línea (um):" (set to 100), "Grosor de línea2 (um):" (set to 100), "Separación (mm):" (indicated by a pink box), and "Separación2 (mm):" (indicated by a pink box). There are buttons for "Cargar datos de" and "Guardar ventana...". The "Datos de la simulación" section includes "Frec mínima (GHz):" (0.6), "Frec máxima (GHz):" (6), and "Ángulos (°):" (0). At the bottom, there are three checked checkboxes: "Con dos FSS", "Polarización perpendicular", and "Polarización paralela".

Figura 4. 3. Datos introducidos en el programa de simulación

4.1 Optimización para frecuencias concretas

Una forma de realizar el diseño de una ventana con FSS es obtener un nulo de atenuación para una frecuencia concreta del rango en el que trabajamos. Para desarrollar el algoritmo correspondiente primero se ha planteado el problema teórico a resolver.

Se quiere obtener cuál es el valor de los condensadores de las FSS que anulan la atenuación para el modelo de ventana concreto que se estudia en este proyecto (Figura 4. 4). Este problema se va a poder resolver solamente para una frecuencia determinada. Es un problema idéntico al clásico de adaptación con dos ramales cortocircuitados. Un ramal acabado en cortocircuito proporciona siempre una impedancia de entrada imaginaria pura. Si esta impedancia es negativa, podría sustituirse por un condensador,

como los de nuestras FSS. Conseguir la condición de adaptación del circuito es equivalente a conseguir atenuación nula en nuestra ventana.

Primero se irá obteniendo la impedancia de entrada de cada tramo en serie de líneas de transmisión hasta llegar a la FSS2 a partir de la fórmula:

$$Z_i = \frac{\eta_a + j\eta_v \tan\beta d_v}{\eta_v + j\eta_a \tan\beta d_v}$$

Posteriormente, se calculará el paralelo entre la admitancia $Y_i = 1/Z_i$ de entrada hasta el momento y el condensador de la FSS2 $Y_A = Y_i + j2\pi f C_2$.

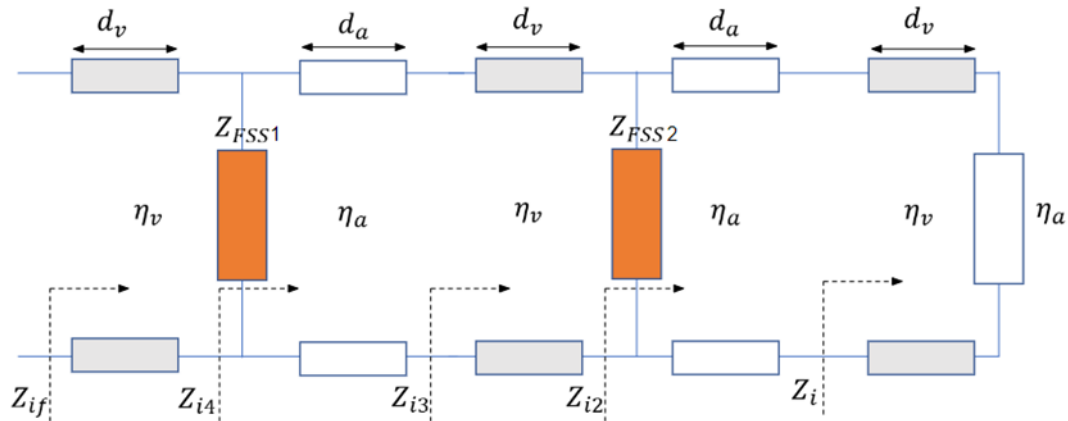


Figura 4. 4. Modelo de líneas de transmisión a resolver para una frecuencia determinada

Esto se realizará dos veces, una por cada FSS. Al final obtendremos una impedancia de entrada del circuito completo en función de los valores de los dos condensadores C_1 y C_2 (uno para cada FSS).

La condición de adaptación es que la impedancia de entrada sea igual a la de referencia (que en este caso es la impedancia del aire $\eta_a = \eta_0$). De esa ecuación compleja se obtendrán los valores de C_1 y C_2 . Como el problema de adaptación con dos ramales tiene dos soluciones, se encontrarán dos parejas de posibles valores.

Para que una solución sea válida, deberá ser real y positiva, algo que no ocurre en todos los casos.

Con estos condensadores obtenidos y con los parámetros de nuestras ventanas, y sustituyendo en la ecuación (5):

$$C_{FSS} = \frac{D \cdot \epsilon_0 (\epsilon_{r1} + \epsilon_{r2})}{\pi} \ln \left(\frac{1}{\sin \left(\frac{\pi W}{2D} \right)} \right)$$

se conseguirá obtener para una frecuencia determinada el valor de la separación (periodicidad) de nuestra FSS (D en la fórmula). Con el valor obtenido para D se simulará la ventana con el método desarrollado en el capítulo 3 y podrá verificarse que el mínimo de atenuación coincide con lo calculado.

Este procedimiento ha sido implementado en Matlab siguiendo los pasos y las ecuaciones mencionadas anteriormente. Para resolver la ecuación se utilizará el *toolbox* de matemática simbólica de Matlab, que nos permite resolver una ecuación dependiente de varias variables (Ver Anexo 2).

Estas soluciones solo serán válidas para una frecuencia determinada, por ello en este proyecto se ha decidido encontrar los valores óptimos para distintas frecuencias de interés. Además, hay que tener en cuenta que en algunos casos no se tendrá solución y no se puede conseguir un nulo de atenuación absoluto. Esto ocurre habitualmente para las frecuencias superiores a 3 GHz, donde las ventanas que estudiamos tienen atenuación muy alta.

También se realizaron los mismos cálculos variando el espesor de la cámara de aire en lugar de la periodicidad de las FSS. Así se podía obtener que cámara de aire utilizar si se quiere conseguir un mínimo para una frecuencia concreta. De la misma manera, se forzó una solución real y positiva y que ambas cámaras de aire fuesen iguales.

4.1 Nulos de atenuación para las principales frecuencias de telefonía móvil

Mediante el programa anterior, con el que se consigue calcular para qué valor de los condensadores de las FSS la atenuación es nula, se intentarán conseguir nulos en las principales frecuencias de telefonía móvil:

Uso de tecnologías, frecuencias y bandas por operadores

	5G		4G		2G	3G
Frecuencia	700 MHz	3500 MHz	800 MHz	2600 MHz	1800 MHz	900MHz
Banda	28	78	20	7 y 38	3	8
Movistar	20 MHz	100 MHz	20 MHz	40 MHz nacional 20 MHz autonómico	40 MHz	29.6 MHz
Vodafone		90 MHz		40 MHz FDD 20 MHz TDD		30 MHz FDD 5 MHz TDD
Orange		110 MHz		40 MHz nacional 40 MHz autonómico		20 MHz

Fuente: Telefónica

Figura 4. 5. Frecuencias de las distintas generaciones de telefonía móvil en España.[9]

Hay que tener en cuenta que, en los acristalamientos en los que se está trabajando, para las frecuencias más altas (4-6GHz), la atenuación será muy alta y será imposible encontrar un mínimo para estas frecuencias. En la Figura 4. 6 podemos ver nuestra ventana sin FSS, exclusivamente formada por vidrios. Se puede ver cómo esta estructura multicapa por sí misma, sin FSS, ya tiene una atenuación alta en las frecuencias de 4-6GHz.

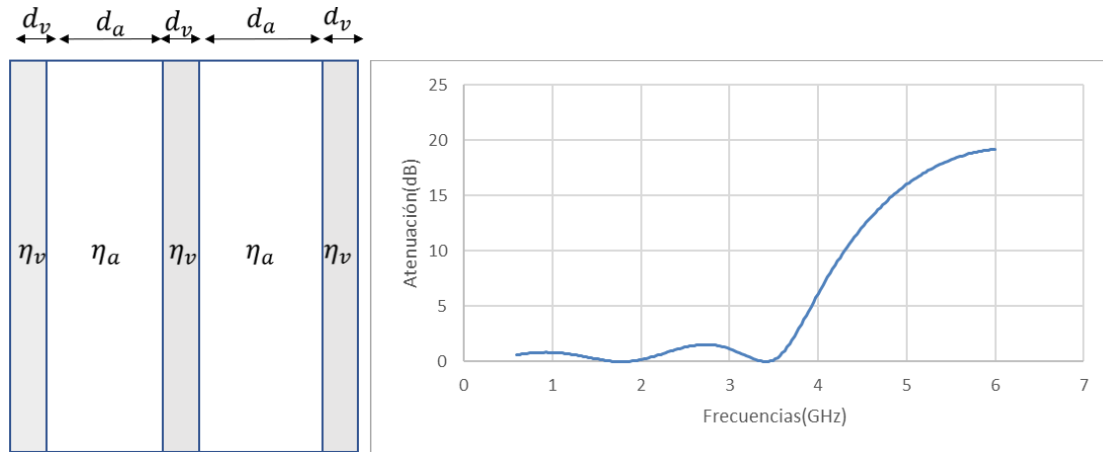


Figura 4. 6. Estructura multicapa sin FSS y su atenuación

El requisito que hemos exigido para considerar que la señal pasa a través de las distintas capas de la ventana adecuadamente es que se atenúe menos de 10 dB.

Imponiendo tener un nulo en 700MHz, obtendremos una periodicidad para ambas FSS de 33mm ($D_1=D_2=33\text{mm}$). Este valor es relativamente grande y supone quitar menos capa de metal mediante el láser, por lo que sería un muy buen resultado si se quisiera dejar pasar solamente la banda de 700MHz. El problema, como podemos ver en la Figura 4.7, es que el rango de frecuencias para el que cumplimos el criterio de atenuación es muy pequeño, por lo que este diseño no sería adecuado para la mayoría de las aplicaciones. Lo mismo ocurriría al obtener nulos en las frecuencias de 800MHz ($D_1=25\text{mm}$ $D_2=27\text{mm}$) y 900MHz ($D_1=20\text{mm}$ $D_2=21\text{mm}$), como se puede observar en la Figura 4.7.

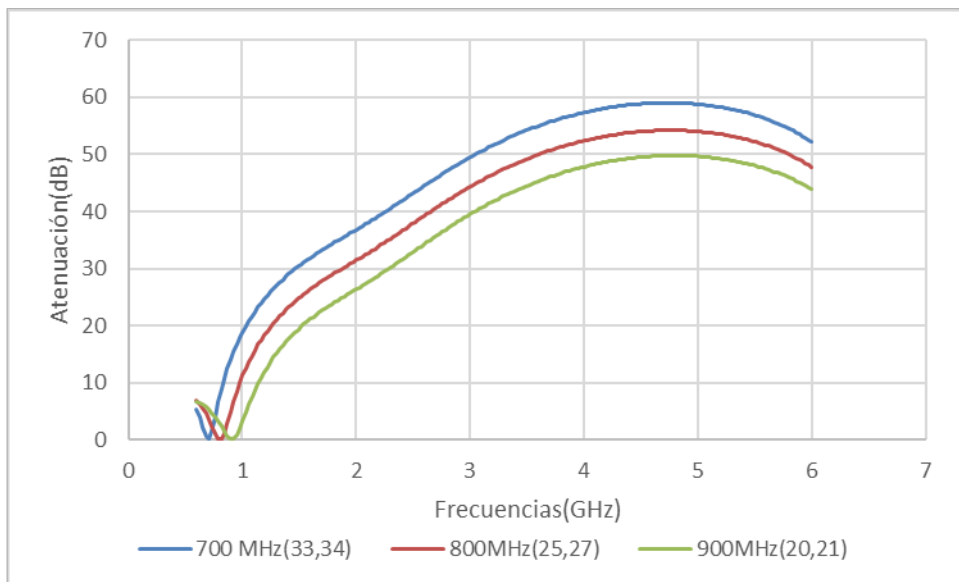


Figura 4.7. Simulación de una ventana con un mínimo de atenuación en 700 MHz, 800MHz y 900MHz para un ángulo de incidencia de 0°.

Si se fija el mínimo de frecuencia en torno a 1.3 GHz, se obtienen valores inferiores de D_1 y D_2 (de 8 y 10 milímetros respectivamente) y una atenuación inferior a 10 dB hasta 2 GHz. Disminuyendo la periodicidad de la FSS se ha conseguido aumentar el rango de frecuencias en los que la atenuación cumple este requisito (Figura 4.8).

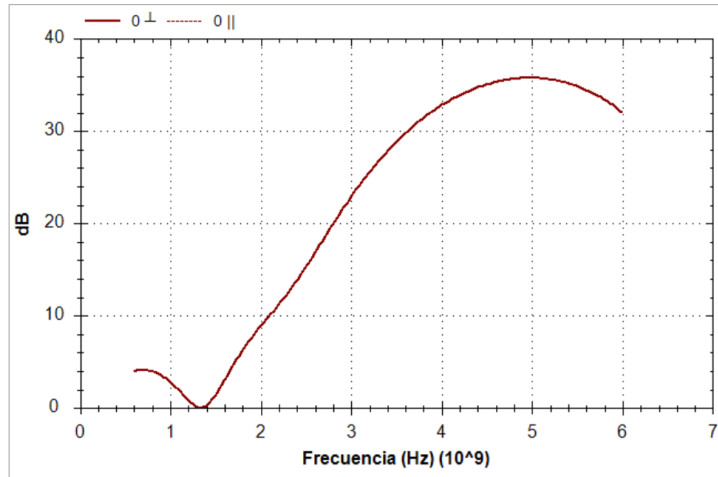


Figura 4.8. Simulación de una ventana con un mínimo de atenuación en 1.3 GHz para un ángulo de incidencia de 0°.

Por último, se ha querido obtener un mínimo en 1.8 GHz (Figura 4.9), que es la frecuencia compartida por el 2G y el 4G. Para este caso, mediante el programa de simulación hemos obtenido unos condensadores de 0.115 pF y 0.252 pF y, por tanto, unas periodicidades de 2 y 3 mm. Se observa una respuesta en frecuencia aún más plana (hasta 3GHz) que en los casos anteriores y hasta los 3.5GHz no se superan los 10 dB de atenuación. Esta composición de ventanas y FSS será válida tanto para 4G y 2G (en la banda de 1.8 GHz) como para 3G (en la banda tanto de 900MHz como de 2.1GHz) y 5G (en la banda de 700MHz). Por lo tanto, esta será una de las ventanas que se fabricará y se caracterizará experimentalmente para compararla con los resultados obtenidos en esta simulación. El único problema que tiene es que, al realizarse las FSS con unas separaciones muy pequeñas se quitará mucha capa metálica mediante el láser, por lo que las propiedades térmicas de estos vidrios bajo-emisivos (para no radiar calor al interior o al exterior de un habitáculo) empeorarán.

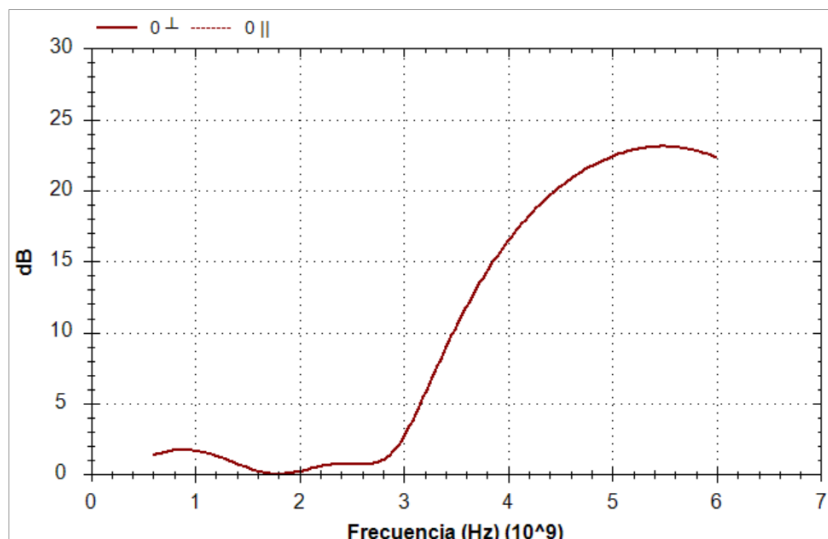


Figura 4.9. Simulación de una ventana con un mínimo de atenuación en 1.8 GHz para un ángulo de incidencia de 0°.

Para esta misma estructura se probado a cambiar el grosor de la línea a uno menor, 80 micrómetros, pero el resultado es prácticamente igual, como se observa en la Figura 4.10.

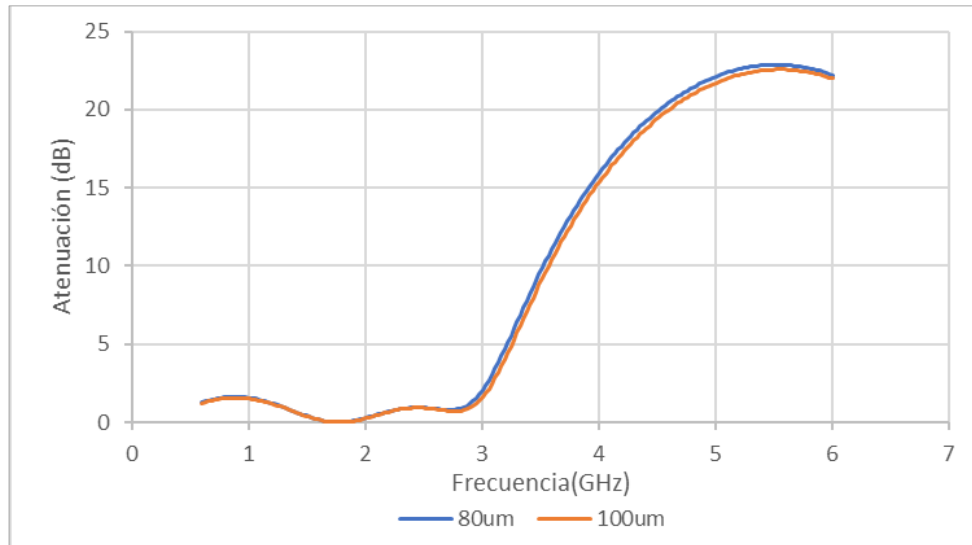


Figura 4.10. Simulación de una ventana con una separación de las FSS de 2mm y 3mm y un grosor de línea de 80um(azul) y 100um(naranja)

A partir de una frecuencia de 3.5GHz (5G) ha sido imposible obtener una configuración para la que la señal se atenúe menos de 10 dB, por lo que no se ha realizado un diseño de FSS para este caso.

4.2 Variación del espesor de las cámaras de aire

Ahora se va a probar a cambiar el espesor de la cámara de aire exclusivamente para la ventana elegida, que contiene dos FSS de periodicidad 2 mm y 3 mm respectivamente y con grosor de línea de 100 μm.

Al resolver el circuito equivalente para obtener un mínimo en una frecuencia determinada, obtendremos para tener un nulo en 2.1GHz (frecuencia del 3G) se necesita una cámara de aire de 10 mm, para obtener un nulo en 2.6GHz(4G) una cámara de aire de 6 mm y para conseguir un mínimo en 3.5GHz(5G) se necesitará una cámara de 2 mm. En la Figura 4.11 se muestran los resultados para las distintas cámaras de aire.

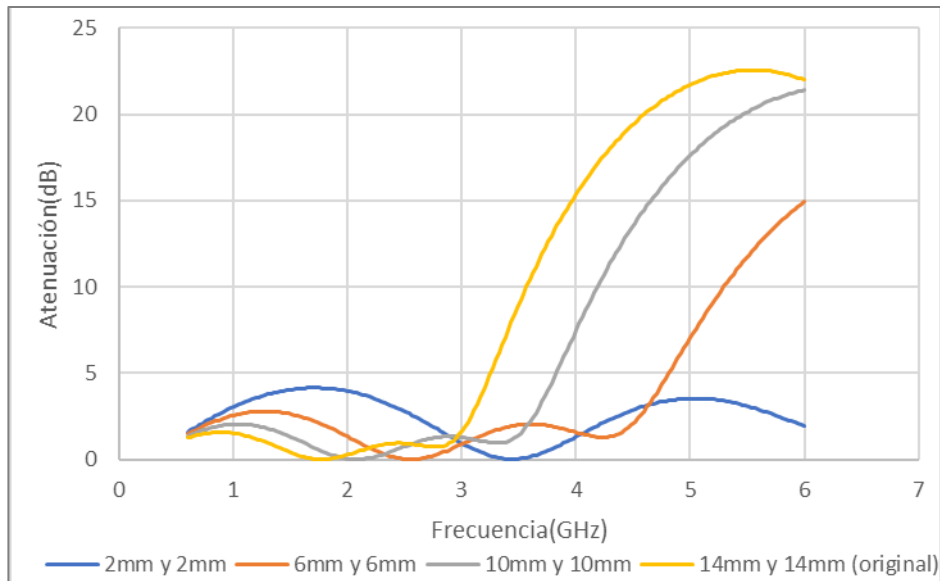


Figura 4.11. Comparación de una misma ventana con distintas cámaras de aire

En el diseño inicial de la ventana, con una cámara de 14 mm, el mínimo de atenuación se obtenía en 1.8GHz y el rango de frecuencias válido llega solamente a 3.5GHz (gráfica amarilla). Al disminuir el espesor de la cámara de aire se observa como el mínimo que se encontraba en 1.8GHz pasa a 2.1GHz y el rango de frecuencias válido aumenta. Algo parecido ocurre con la ventana con cámaras de aire de 6mm.

Reducir mucho la cámara puede no ser práctico, ya que al utilizar cámaras de aire tan pequeñas no se producirá un buen aislamiento entre el interior y el exterior de los vehículos, por lo que se pierde la característica principal y más importante de este tipo de ventanas. Aunque con estas modificaciones se quiera conseguir la mejor cobertura en el interior del tren, hay que tener en cuenta que no todo vale a la hora de modificar todos los componentes de las ventanas. En conclusión, modificar la cámara de aire nos da más libertad para conseguir la mínima atenuación a una frecuencia determinada, pero existe un compromiso entre dejar pasar más señal o mejorar el aislamiento.

4.3 Comparación de todas las ventanas

Una vez diseñadas ventanas con nulos en distintas frecuencias de interés, se han simulado éstas y otras con dimensiones de FSS intermedias.

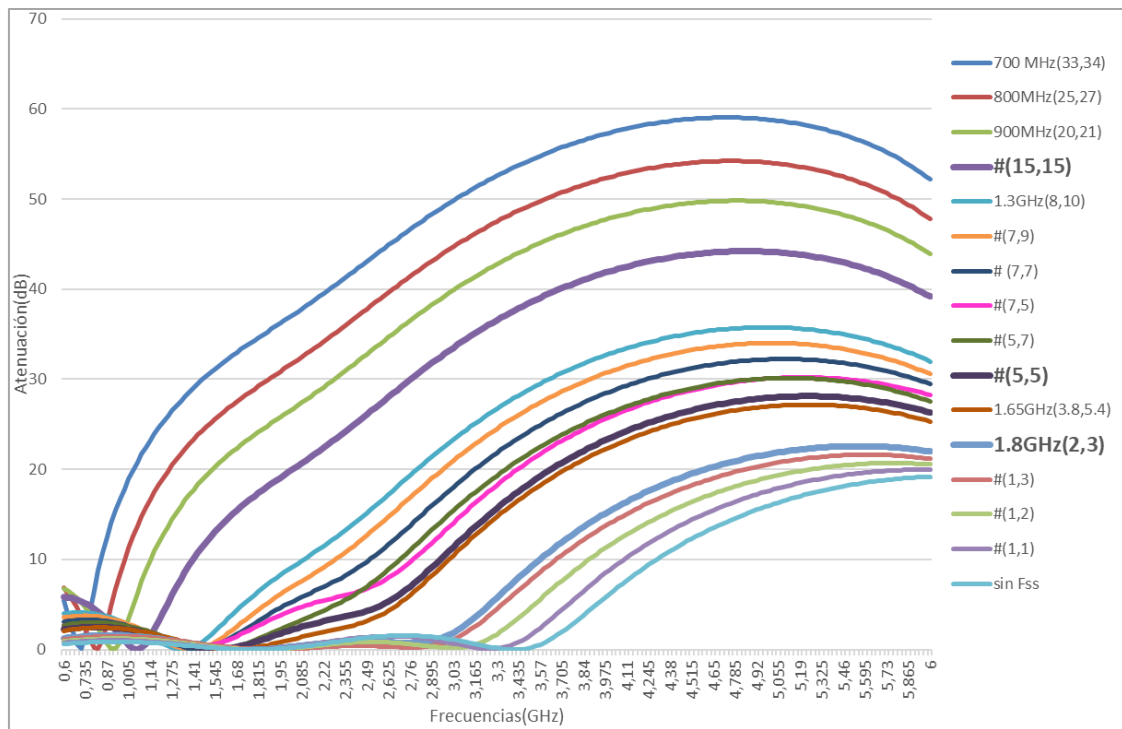


Figura 4.12. Simulación de ventanas con distintas FSS

En la Figura 4.12 se puede ver la atenuación de las ventanas de los apartados previos., etiquetadas por su frecuencia de nulo de atenuación o por su periodicidad si corresponden a FSS con periodicidades intermedias.

Como se puede observar en la gráfica, el grupo formado las ventanas con una de las FSS de 1 mm o 2 mm es el que tiene atenuación menor y más plana. Por ello éstas son las soluciones mejores para permitir el paso de radiofrecuencia (aunque también son aquellas en las que se retira más capa y empeora más el aislamiento).

Para comprobar el correcto funcionamiento de la simulación, se escogerán otras dos ventanas. La primera de ellas será aquella en la que se retire muy poca capa metálica, por ello se ha elegido una ventana con dos FSS de 15mm. La otra ventana será la formada por dos FSS de 5mm, ya que es una periodicidad intermedia entre las dos ventanas elegidas anteriormente.

Cabría destacar que la ventana formada por dos FSS de 15 mm de separación podría utilizarse para dejar pasar las frecuencias telefónicas y no las de Wi-fi (en color morado y resaltada en la Figura 4.12). A partir de los 2.4GHz (primera banda de Wi-fi) se atenúa 25 dB la señal y entre las frecuencias de 0 y 1.5GHz se deja pasar la señal (en 1.4GHz se atenúa 10dB y en 1.65GHz se atenúa 15 dB), teniendo su mínimo en 1.05GHz. Se trataría de una aplicación muy concreta, ya que solo dejaría pasar un rango muy pequeño de frecuencias y las altas frecuencias se atenuarían muchísimo. La otra banda de Wi-fi, que se encuentra entorno a los 5GHz, quedará muy atenuada (44.2 dB) por lo que esta no pasará.

Esto puede ser utilizado para evitar interferencias de la red wifi y garantizar así una buena calidad de la señal de los móviles. Se podría utilizar en hospitales, para que los equipos médicos no sean afectados por dichas interferencias, o en oficinas o en hogares si se quiere conseguir dicha finalidad.

Capítulo 5. Resultados experimentales

Durante este apartado se va a explicar cómo se han realizado las medidas de los prototipos propuestos en el apartado anterior, así como la verificación de la capacidad de predicción del método de simulación.

5.1 Método de medida

Antenas

Para la medición de la atenuación de la señal se usaron dos antenas tipo Vivaldi en el rango 600 MHz – 6 GHz (TSA600 de RFSpace).

Estas antenas han sido escogidas debido a que nos permiten caracterizar las muestras en el rango de frecuencias de interés para poder compararlas con nuestras simulaciones.

Cámara anecoica

Las medidas se van a realizar con las antenas dentro de la cámara anecoica del laboratorio de alta frecuencia de la Universidad de Zaragoza. Se pondrá una placa de metal para evitar reflexiones secundarias por los laterales de la ventana. Además, se elevaron las ventanas para que quedaran justo en el hueco que hay en la placa de 25x25 cm, a diferencia de los vidrios de las ventanas que son de 30x30cm (Figura 5.1).



Figura 5.1. Montaje dentro de la cámara anecoica

Analizador Vectorial de Redes

El analizador vectorial de redes utilizado es un PicoVNA 106 de Pico Technology calibrado en el rango de 300 KHz a 6 GHz (Figura 5.2). A partir de este dispositivo obtendremos los parámetros S, los cuales serán obtenidos después de realizar la calibración del instrumental de medida y poner las antenas en las posiciones que corresponda.



Figura 5.2. Analizador vectorial de redes PicoVNA

5.2 Medida del índice de refracción del vidrio

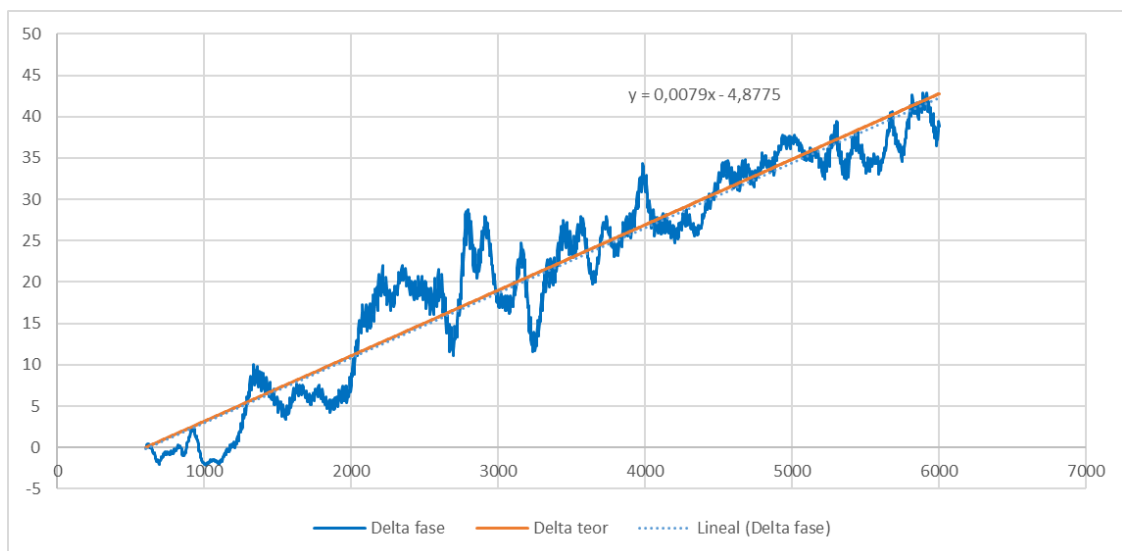


Figura 5. 3 Desfase producido por un vidrio de 4mm de espesor

Para poder determinar con precisión el índice de refracción del vidrio en las frecuencias de interés, se midió en la cámara anecoica la fase de la señal atravesando un vidrio de 4

mm y después se midió la fase sin el vidrio para obtener así el desfase $\Delta\theta$ entre estas dos situaciones (en azul en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

La diferencia de fase depende proporcionalmente de la frecuencia, por ello será una recta ascendente que corresponderá a la siguiente ecuación:

$$\Delta\theta = \theta_0 - \theta_v = \frac{2\pi f}{c} d(n_v - n_0).$$

El delta teórico es el desfase obtenido si el índice de refracción fuera de 2.65 y la línea de puntos es un ajuste a la recta, por lo que se puede concluir que 2.65 sería una muy buena aproximación al índice de refracción que tienen nuestros vidrios medidos en la cámara.

5.3 Fabricación de los prototipos diseñados

Ventanas elegidas	Ventana 1		Ventana 2		Ventana 3		Ventana 4		Ventana 5	
	1ªFSS	2ªFSS	1ªFSS	2ªFSS	1ªFSS	2ªFSS	1ªFSS	2ªFSS	1ªFSS	2ªFSS
Periodicidad de las FSS (mm)	2	3	5	5	15	15	10	10	2	10

Tabla 1. Ventanas elegidas

Para verificar las predicciones de la simulación, se han fabricado los prototipos de ventanas de la Tabla 1 mediante la composición de cámaras de aire de 14mm y de vidrios monolíticos de 4mm de espesor. Sobre estos vidrios se ha depositado una capa de plata en la instalación de deposición del Grupo de Tecnologías Fotónicas. A continuación, en la empresa Ariño Duglass se han grabado con láser las FSS escogidas en el apartado anterior, como se puede observar en la Figura 5.4.

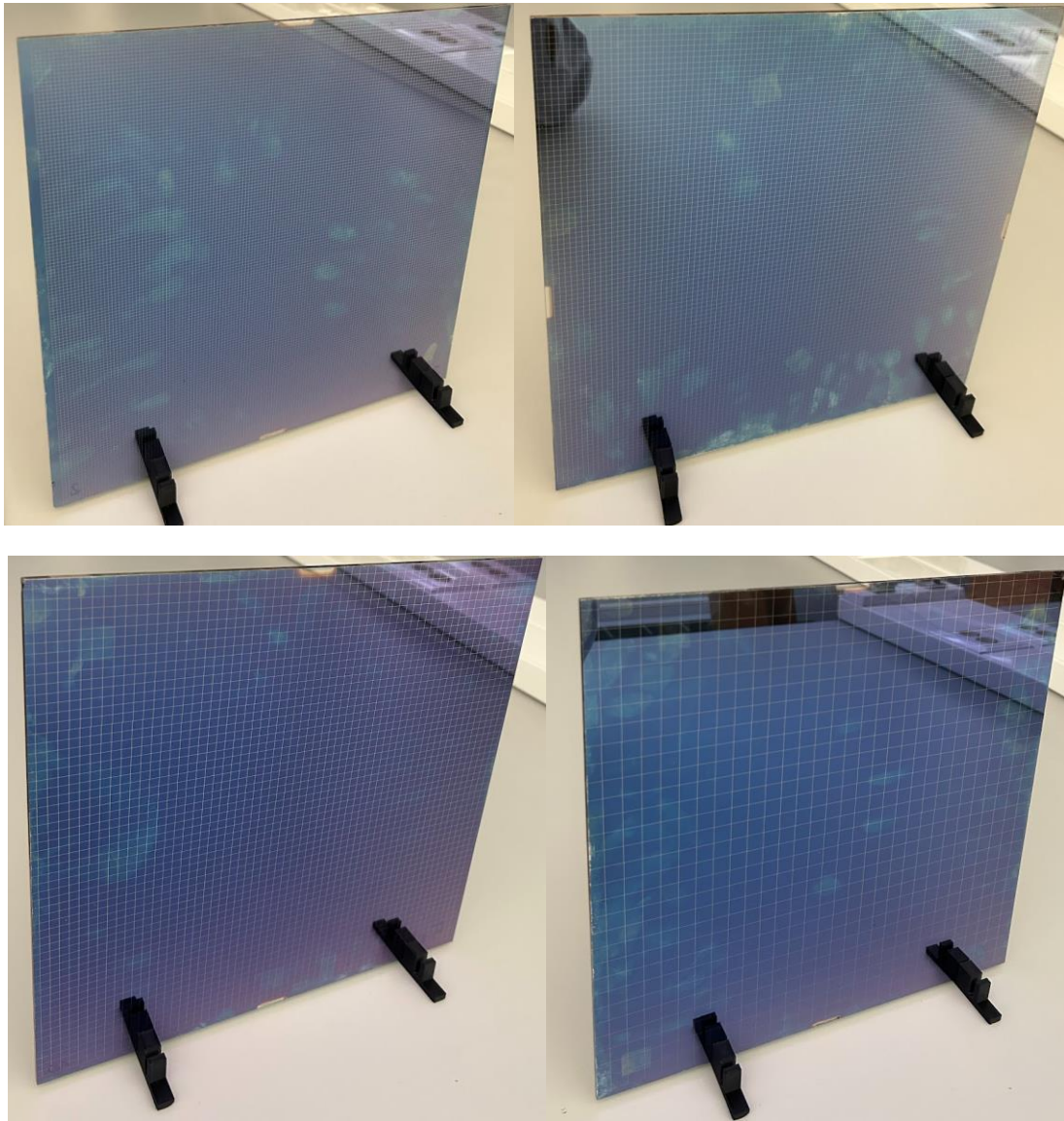


Figura 5.4. Vidrios con FSS de 2 mm, 3 mm, 5 mm y 10 mm.

A partir de estos vidrios y unos pies fabricados con una impresora 3D, se han podido componer distintas ventanas (Figura 5.5), dejando entre los vidrios que tenemos un espacio de 14 mm correspondiente a la cámara de aire. Entre la chapa metálica de la cámara anecoica y la propia ventana no debe haber prácticamente separación para que no afecte a nuestras medidas. Los dos primeros vidrios son los que estarán formados por una FSS cada uno y el último será exclusivamente un vidrio de 4mm sin FSS para conseguir así emular el triple acristalamiento de la ventana.

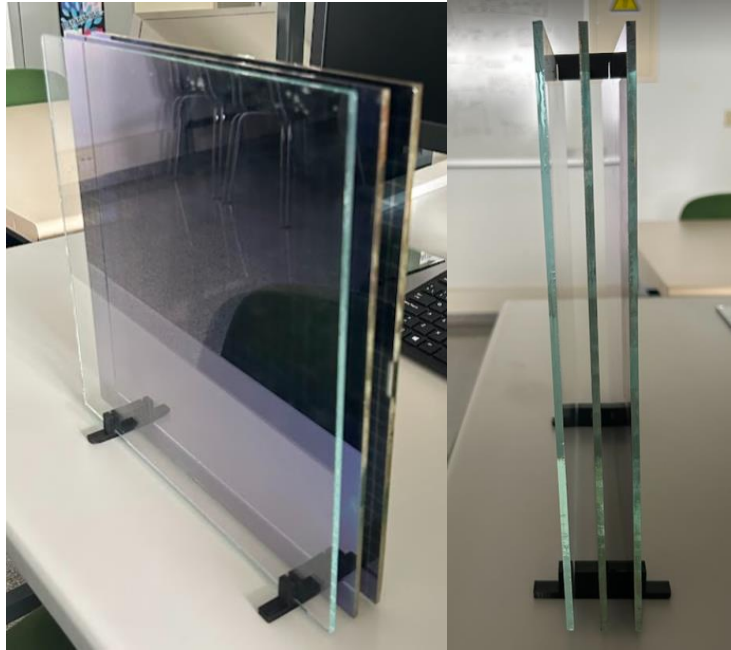


Figura 5.5. Montaje de la ventana con tres vidrios de 4mm y dos cámaras de aire de 14 mm.

Para medir con distintos ángulos de incidencia habrá que mover las antenas. Por problemas de espacio, las medidas se realizarán exclusivamente para ángulos de 0° (Figura 5.1), 22.5° y 45° (Figura 5.6).



Figura 5.6. Antenas posicionadas a 22.5° y 45°

También habrá que cambiar la posición de las antenas para radiar la señal con polarización perpendicular (TE, con el campo eléctrico perpendicular al plano de incidencia) o polarización paralela (TM, con el campo eléctrico paralelo al plano de incidencia). Podemos observar ambas polarizaciones en la Figura 5.7.

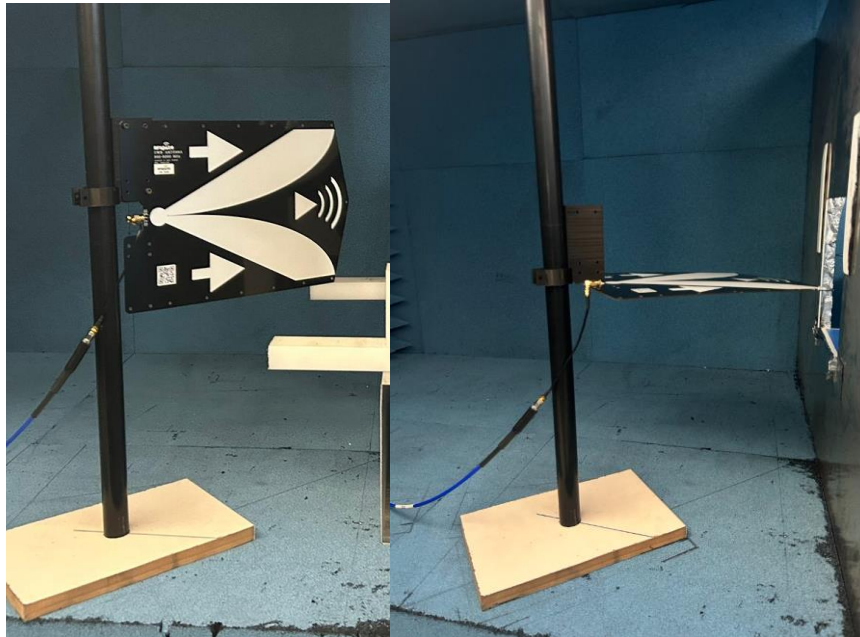


Figura 5.7. Antenas con polarización TE y TM

5.4 Medidas y comparación con las simulaciones

Para concluir con el objetivo del proyecto se van a medir las distintas ventanas elegidas en el capítulo 4 a partir del método de medida previamente explicado, colocando uno a uno los vidrios de los que se dispone (dos de ellos con FSS y uno sin FSS).

Se comenzarán a medir la primera ventana elegida, formada por dos de los vidrios que tienen grabadas FSS de 2mm y otra de 3mm.

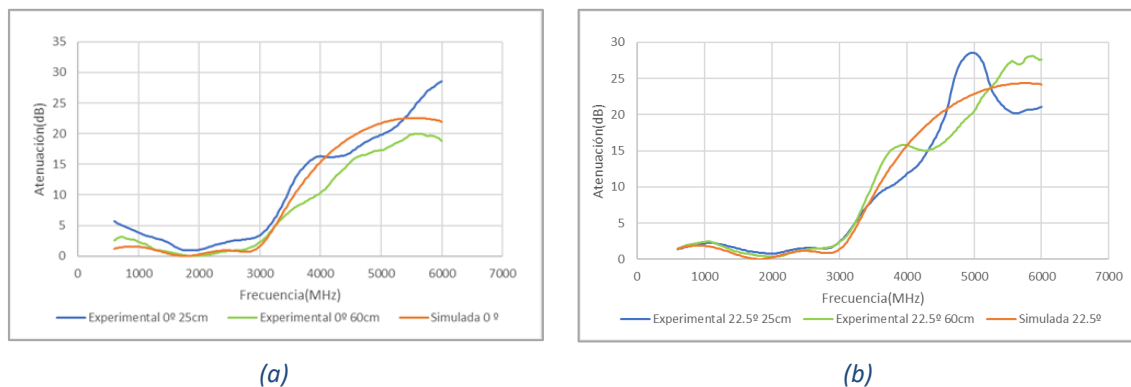


Figura 5.8. Atenuación de una ventana con FSS 2 mm y 3 mm a distintas distancias para polarización TE

Como se puede observar en la Figura 5.8, cambiando la distancia de las antenas a la ventana la atenuación de la señal cambia. Esto es debido a que en la cámara anecoica existen reflexiones secundarias, que son más visibles cuando la señal directa sufre más atenuación.

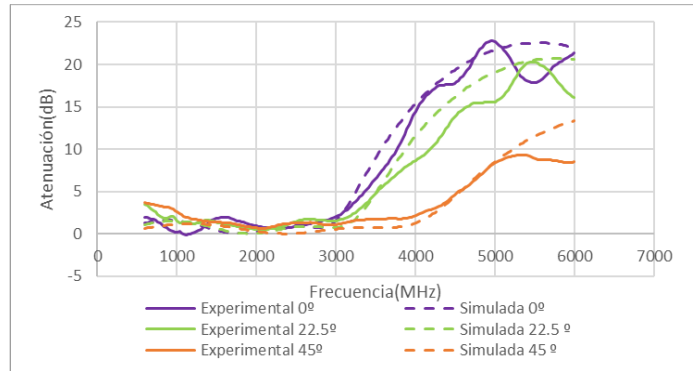


Figura 5.9. Atenuación de una ventana con FSS 2mm y 3mm para polarización TM

Podemos concluir con esto que la ventana seleccionada tiene muy baja atenuación para los ángulos de incidencia representados y será una buena alternativa para aplicaciones en las que se quiera conseguir una atenuación inferior a 10dB hasta 3.5GHz.

Se realizan las mismas medidas para la segunda ventana, aquella formada por dos FSS de 5 mm cada una, y se obtienen los siguientes resultados:

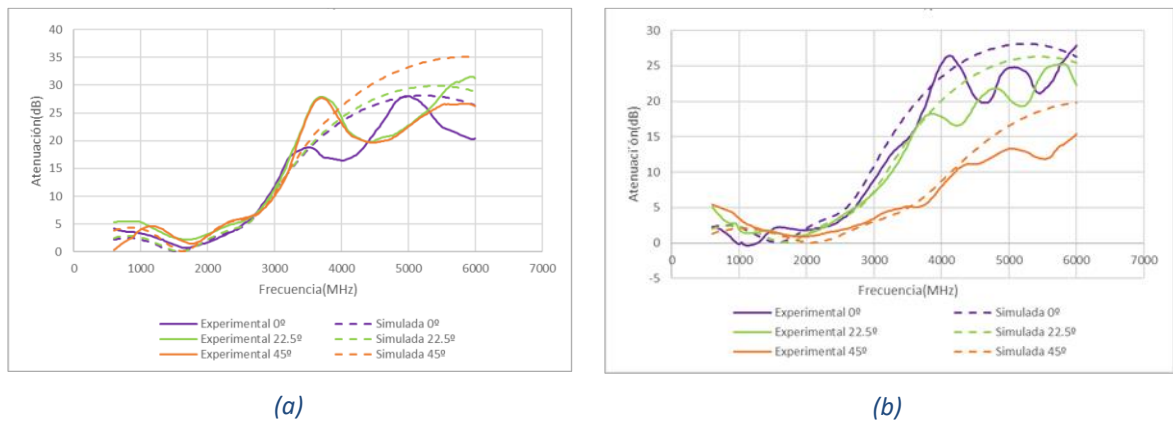


Figura 5. 10. Atenuación para ventana con dos FSS de 5mm, para polarización TE (a) y TM (b)

Esta es una opción intermedia si no se quiere quitar demasiada capa metálica y se quiere conseguir poca atenuación para el primer rango de frecuencias.



Figura 5.11. Ventanas con dos FSS de 15mm cada una.

La tercera combinación elegida (FSS de 15 mm) se fabricó en Ariño Duglass en forma de ventana completa de 50x50cm (Figura 5.11.). Se obtuvo la atenuación que se muestra en la Figura 5.12, similar a la obtenida en las simulaciones.

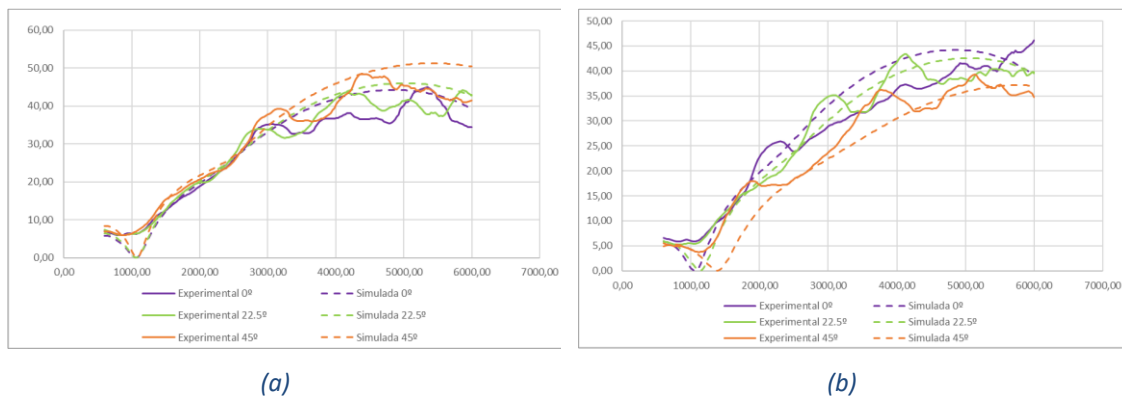


Figura 5.12. Atenuación de una ventana con dos FSS de 15mm, para polarización TE (a) y TM (b)

Además de las FSS elegidas se disponía de vidrios con FSS de 10mm. Realizamos un par de pruebas más para compararlas con las simulaciones (ventanas 4 y 5):

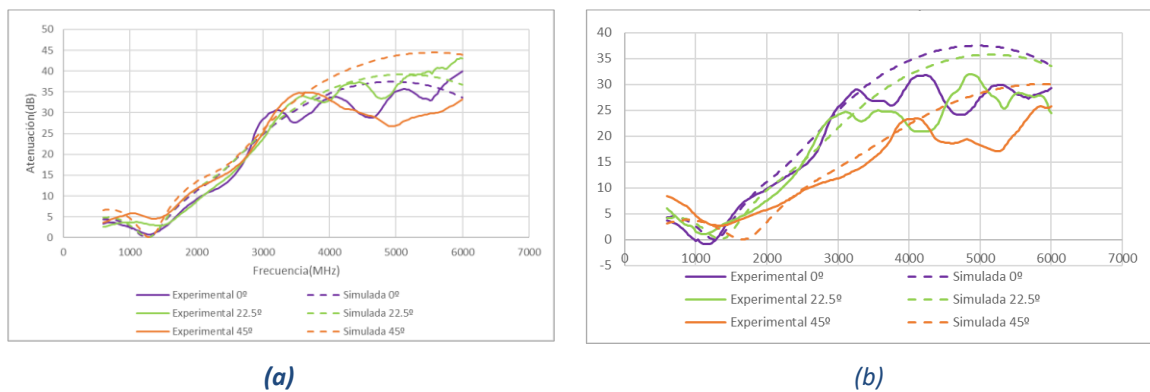


Figura 5.13. Atenuación para ventanas con dos FSS de 10mm, para polarización TE(a) y TM(b).

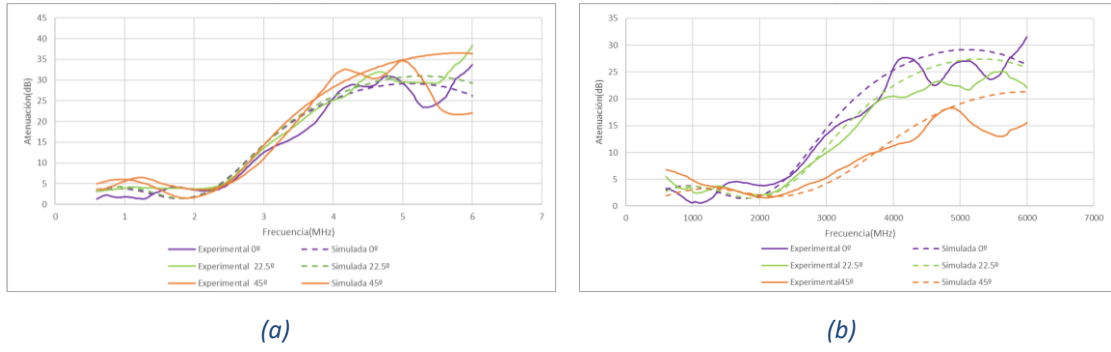


Figura 5.14. Atenuación para ventanas formadas por una FSS de 2mm y otra de 10mm, para polarización TE(a) y TM(b)

En la Figura 5.13 y la Figura 5.14 se puede observar como la simulación también se aproxima a la experimental bastante bien, especialmente para el primer tramo de frecuencias de la representación.

Capítulo 6. Conclusiones y líneas futuras

En este Trabajo Fin de Grado se ha cumplido con el objetivo principal, el estudio teórico del comportamiento de acristalamientos con múltiples superficies selectivas en frecuencia a partir de un modelo equivalente de líneas de transmisión.

Se ha implementado un programa de simulación en Matlab y C#, a partir del equivalente circuital de líneas de transmisión, de acristalamientos con múltiples superficies selectivas en frecuencia.

Se han contrastado los resultados de las simulaciones con medidas experimentales en la cámara anecoica para un rango de frecuencias entre los 600 MHz y 6 GHz.

A partir de las simulaciones es posible el diseño de las superficies selectivas en frecuencia deseadas.

El sistema de medida utilizado permite medir la atenuación de ventanas con dos FSS con la precisión suficiente en los rangos de frecuencia de interés.

Como continuación a este proyecto se podría probar el funcionamiento del sistema en un entorno real, por ejemplo, en un vagón de tren.

También sería interesante realizar las medidas en una cámara anecoica mejor aislada, para ver si en las frecuencias más altas la medida se acerca más a la simulación

Otra línea futura importante sería incrementar el número de capas de las ventanas e introducir nuevas FSS en ellas para ver cómo influye esto en la atenuación de las señales de comunicaciones móviles.

Por último, este trabajo abre las puertas a seguir investigando el uso de patrones más complejos de FSS en vidrios bajoemisivos y de control solar.

Bibliografía

- [1] Luc Burnier, Matteo Lanini, Olivia Bouvard, Damiano Scanferla, Abiraam Varathan, Carine Genoud, Arnaud Marguerit, Bernard Cuttat, Noémie Dury, Reiner Witte, Andrea Salvadè, Andreas Schüller, “Energy saving glazing with a wide band-pass FSS allowing mobile communication: up-scaling and characterisation”, IET Microwaves, Antennas and Propagation 11.10, 2017, pp.1149-1455.
- [2] Björn Widenberg and José Víctor Rodríguez. *Design of Energy Saving Windows with High Transmission at 900 MHz and 1800 MHz*. Tech. rep. Lund University, enero 2002.
- [3] Víctor Guijarro Gómez, “Estudio y diseño de una metasuperficie en banda X para la monitorización de la salud estructural de los aviones”. Trabajo Fin de Grado (Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid)
- [4] Ben A. Munk, “Frequency Selective Surfaces. Theory and Design”, A. Wiley, 2000
- [5] Pilar Castillo Tapia, “Estudio teórico y experimental del apantallamiento electromagnético de acristalamientos bajoemisivos en las bandas de telefonía móvil. Propuestas estructuras pasobanda”. Trabajo Fin de Grado (Máster en Ingeniería de Telecomunicación, Universidad de Zaragoza).
- [6] Rocío Chueca, Raul Alcain, Carlos Heras, Iñigo Salinas. *Modelling of Frequency Selective Surfaces on Multi-layered Glazing Windows*. Global Conference on Wireless and Optical Technologies (GCWOT), Universidad de Zaragoza, 2022.
- [7] Filippo Costa, Agostino Monorchio, Giuliano Manara, “An Overview of Equivalent Circuit Modeling Techniques of Frequency Selective Surfaces and Metasurfaces”, ACES Journal, Vol 29, No 12, December 2014
- [8] Hong Xiao, Meiwu Shi and Jianying Chen, “Electromagnetic Function Textiles”, IntechOpen, 2019, p.25.
- [9] <https://www.movistar.es/blog/5g/frecuencias-5g-que-son-y-porque-son-importantes/>

Anexo 1. Código Visual Studio

```
using System;
using System.Numerics;
using System.Globalization;
using System.Windows.Forms;
using System.IO;
using ZedGraph;
using System.Drawing;
using ClosedXML.Excel;

namespace MulticapasFSS
{
    public partial class Principal : Form
    {
        int nCapas;
        double[] espesores;
        double[] indices;
        double[] alphas;
        int capaFSS;
        int capaFSS2;
        double grosorFSS;
        double grosorFSS2;
        double separacionFSS;
        double separacionFSS2;
        double[] frecuencias;
        double[] angulos;
        double fMin;
        double fMax;
        int nPuntos=200;
        double[] thetas = { 0, 45, 60 };
        double eta0 = 120 * Math.PI;
        private NumberFormatInfo formato;
        Color[] colores = new Color[7] { Color.White, Color.Black, Color.DarkRed,
        Color.DarkBlue, Color.Orange, Color.Green, Color.LightBlue };
        XLWorkbook libro=new XLWorkbook();

        public Principal()
        {
            InitializeComponent();
            formato = new NumberFormatInfo();
            formato.NumberDecimalSeparator = ".";
            IniciarGrafica(zedGraphControl);
            frecuencias = new double[nPuntos+1];
            CargarVentana("Ventana.txt");
        }
        private void IniciarGrafica(ZedGraphControl miGrafica)
        {
            GraphPane panelGrafica = miGrafica.GraphPane;
            panelGrafica.ZoomStack.Clear();
            panelGrafica.CurveList.Clear();

            panelGrafica.Fill.Color = colores[0];
            panelGrafica.Chart.Fill.Type = FillType.Solid;
            panelGrafica.Chart.Fill.Color = colores[0];
            panelGrafica.Chart.Border.IsVisible = true;
            panelGrafica.Chart.Border.Color = colores[1];
            panelGrafica.Chart.Border.Width = 1;
            panelGrafica.Title.IsVisible = false;
        }
    }
}
```

```

panelGrafica.Legend.IsVisible = true;
panelGrafica.Legend.Fill.IsVisible = true;
panelGrafica.Legend.Fill.Type = FillType.Solid;
panelGrafica.Legend.Fill.Color = colores[0];
panelGrafica.Legend.Border.IsVisible = false;
panelGrafica.Legend.FontSpec.FontColor = colores[1];
panelGrafica.Legend.FontSpec.Size = 12;
panelGrafica.Legend.Position = LegendPos.Top;

panelGrafica.XAxis.Color = colores[1];
panelGrafica.XAxis.Title.FontSpec.FontColor = colores[1];
panelGrafica.XAxis.Title.FontSpec.Size = 14;
panelGrafica.XAxis.Title.Text = "Frecuencia (Hz)";
panelGrafica.XAxis.Scale.FontSpec.FontColor = colores[1];
panelGrafica.XAxis.Scale.FontSpec.Size = 14;
panelGrafica.XAxis.Scale.MaxAuto = true;
panelGrafica.XAxis.Scale.MinAuto = true;
panelGrafica.XAxis.MajorGrid.IsVisible = true;
panelGrafica.XAxis.MajorGrid.Color = colores[1];

panelGrafica.YAxis.Color = colores[1];
panelGrafica.YAxis.Title.FontSpec.FontColor = colores[1];
panelGrafica.YAxis.Title.FontSpec.Size = 14;
panelGrafica.YAxis.Scale.FontSpec.FontColor = colores[1];
panelGrafica.YAxis.Scale.FontSpec.Size = 14;
panelGrafica.YAxis.Title.Text = "dB";
panelGrafica.YAxis.Scale.Min = 0;
panelGrafica.YAxis.MajorGrid.IsVisible = true;
panelGrafica.YAxis.MajorGrid.Color = colores[1];

miGrafica.AxisChange();
miGrafica.Invalidate();
}

private void ActualizarGrafica(ZedGraphControl zgc, string nombre,
double[] x, double[] y, bool continua, Color color)
{
    LineItem miCurva=zgc.GraphPane.AddCurve(nombre,x,y,color,
    SymbolType.None);
    miCurva.Line.Width = 2;
    if (continua)
        miCurva.Line.Style = System.Drawing.Drawing2D.DashStyle.Solid;
    else
    {
        miCurva.Line.Style = System.Drawing.Drawing2D.DashStyle.Dash;
        miCurva.Line.Width = 1;
    }

    // Redibujar
    zgc.AxisChange();
    zgc.Invalidate();
    Application.DoEvents();
}

private double[] CalcularMulticapa(double thetaGr, bool FSS, bool TE)
{
    Complex Zi, ZFSS1, ZFSS2, gamma;
    double T;
    double ratio1 = 1;
    double ratio2 = 1;
}

```

```

double[] S21 = new double[frecuencias.Length];
double theta = thetaGr * Math.PI / 180;
double etaAng;
if (TE)
    etaAng = eta0 / Math.Cos(theta);
else
    etaAng = eta0 * Math.Cos(theta);

for (int i = 0; i < frecuencias.Length; i++)
{
    Zi = etaAng;

    for (int j = nCapas - 1; j >= 0; j--) //capas del final hasta FSS
    {

        if (FSS)
        {
            if (j == capaFSS2)
            {
                if (TE)
                    ZFSS2 = impFSS(grosorFSS2, separacionFSS2,
                    indices[capaFSS2], frecuencias[i], 0);
                else
                    ZFSS2 = impFSS(grosorFSS2, separacionFSS2,
                    indices[capaFSS2], frecuencias[i], theta);

                ratio2 = (1 / Zi).Real / ((1 / ZFSS2).Real + (1 /
                Zi).Real);
                Zi = 1 / (1 / Zi + 1 / ZFSS2); // paralelo entre FSS
                y multicapa
            }

            else if (j == capaFSS)
            {
                if (TE)
                    ZFSS1 = impFSS(grosorFSS, separacionFSS,
                    indices[capaFSS], frecuencias[i], 0);
                else
                    ZFSS1 = impFSS(grosorFSS, separacionFSS,
                    indices[capaFSS], frecuencias[i], theta);

                ratio1 = (1 / Zi).Real / ((1 / ZFSS1).Real + (1 /
                Zi).Real);
                Zi = 1 / (1 / Zi + 1 / ZFSS1); // paralelo entre FSS
                y multicapa
            }

        }

        Zi = impEntrada(Zi, indices[j], 0, frecuencias[i],
        espesores[j], theta, TE);
    }

    T = ratio1 * ratio2 * CalcularFraccionPotencia(Zi, etaAng);
    S21[i] = -10 * Math.Log10(T);
}
return S21;

```

```

}

private double CalcularFraccionPotencia(Complex Zi, double etaAng)
{
    double pGen = 1 / (4 * etaAng);
    double pLin = (Zi / (Zi + etaAng) * Complex.Conjugate(1 / (Zi +
etaAng))).Real;
    return pLin / pGen;
}

private double[] CalcularFSS(double thetaGr)
{
    Complex Zi, ZFSS, gamma;
    double T;
    double[] S21 = new double[frecuencias.Length];
    double theta = thetaGr * Math.PI / 180; ;
    for (int i = 0; i < frecuencias.Length; i++)
    {
        ZFSS = impFSS(grosorFSS, separacionFSS, indices[capaFSS],
frecuencias[i], 0);
        Zi = 1 / (1 / (eta0/Math.Cos(theta)) + 1 / ZFSS); // paralelo
entre FSS y aire
        gamma = (Zi - eta0 / Math.Cos(theta)) / (Zi + eta0 /
Math.Cos(theta));
        T = 1 - gamma.Magnitude * gamma.Magnitude;
        S21[i] = -10 * Math.Log10(T);
    }
    return S21;
}

private Complex impEntrada(Complex ZL, double n0, double alpha, double
frecuencia, double L, double theta, bool TE)
{
    Complex Z0, gamma, num, den;
    double theta0;
    Z0 = eta0 / n0;
    theta0 = Math.Asin(Math.Sin(theta) / n0); // ángulos en el material
    gamma = new Complex(alpha, 2 * Math.PI * n0 * frecuencia / 3e8) *
Math.Cos(theta0);
    if (TE)
        Z0 = Z0 / Math.Cos(theta0);
    else
        Z0 = Z0 * Math.Cos(theta0);

    num = ZL + Z0 * Complex.Tanh(gamma * L);
    den = Z0 + ZL * Complex.Tanh(gamma * L);
    return Z0 * num / den;
}

private Complex impFSS(double grosorFSS, double separacionFSS, double
indice, double frecuencia, double theta)
{
    double epseff = 0.5 * (1 + indice * indice);
    double neff = Math.Sqrt(epseff);
    double lambda = 3e8 / (frecuencia* neff);
    double eps0 = 8.85e-12;
    double C2 = separacionFSS * 2 * epseff * eps0 / Math.PI * Math.Log(1
/ Math.Sin(Math.PI * grosorFSS / (2 * separacionFSS)));
    return new Complex(0.01, -1 / (2 * Math.PI * C2 * frecuencia));
}

```

```

private string ElegirFichero()
{
    OpenFileDialog dialogoAbrir = new OpenFileDialog();

    dialogoAbrir.Filter = "Ficheros de texto (*.txt)|*.txt|Todos los
    ficheros (*.*)|*.*";
    dialogoAbrir.FilterIndex = 0;
    dialogoAbrir.CheckFileExists = true;

    if (dialogoAbrir.ShowDialog() != DialogResult.OK)
        return "";
    else
        return dialogoAbrir.FileName;
}
private void CargarVentana(string fichero)
{
    try
    {
        string[] lineas=File.ReadAllLines(fichero);
        string[] vEspesores = lineas[1].Split(new char[1] { ',' },
        StringSplitOptions.RemoveEmptyEntries);
        string[] vIndices = lineas[3].Split(new char[1] { ',' },
        StringSplitOptions.RemoveEmptyEntries);
        textBoxEspesores.Lines = vEspesores;
        textBoxIndices.Lines = vIndices;
        numericUpDownCapaFSS.Text = lineas[5];
        textBoxGrosorFSS.Text = lineas[7];
        textBoxSeparacionFSS.Text = lineas[9];
        numericUpDownCapaFSS2.Text = lineas[11];
        textBoxGrosorFSS2.Text = lineas[13];
        textBoxSeparacionFSS2.Text = lineas[15];
        Calcular();
    }
    catch
    {
        MessageBox.Show("Formato de datos incorrecto", "Error");
    }
}
private void GuardarVentana()
{
    SaveFileDialog dialogoGuardar = new SaveFileDialog();
    dialogoGuardar.Filter = "Ficheros de texto (*.txt)|*.txt |Todos los
    ficheros (*.*)|*.*";
    dialogoGuardar.FilterIndex = 0;
    dialogoGuardar.CheckFileExists = false;
    if (dialogoGuardar.ShowDialog() != DialogResult.OK)
        return;
    StreamWriter escritor=File.CreateText(dialogoGuardar.FileName);
    escritor.WriteLine("Espesores");
    for (int i=0;i<textBoxEspesores.Lines.Length-1;i++)
        escritor.Write(textBoxEspesores.Lines[i]+",");
    escritor.WriteLine(textBoxEspesores.Lines[textBoxEspesores.Lines.Leng
    th - 1]);
    escritor.WriteLine("Indices");
    for (int i = 0; i < textBoxIndices.Lines.Length - 1; i++)
        escritor.Write(textBoxIndices.Lines[i] + ",");
    escritor.WriteLine(textBoxIndices.Lines[textBoxIndices.Lines.Length -
    1]);
    escritor.WriteLine("Posición FSS");
    escritor.WriteLine(numericUpDownCapaFSS.Text);
    escritor.WriteLine("Grosor FSS");
}

```

```

    escritor.WriteLine(textBoxGrosorFSS.Text);
    escritor.WriteLine("Separación FSS");
    escritor.WriteLine(textBoxSeparacionFSS.Text);
    escritor.WriteLine("Posición FSS2");
    escritor.WriteLine(numericUpDownCapaFSS2.Text);
    escritor.WriteLine("Grosor FSS2");
    escritor.WriteLine(textBoxGrosorFSS2.Text);
    escritor.WriteLine("Separación FSS2");
    escritor.WriteLine(textBoxSeparacionFSS2.Text);
    escritor.Close();
}

private void GuardarMedida()
{
    SaveFileDialog dialogoGuardar = new SaveFileDialog();
    dialogoGuardar.Filter = "Ficheros de Excel (*.xlsx)|*.xlsx|All files (*.*)|*.*";
    dialogoGuardar.FilterIndex = 0;
    if (dialogoGuardar.ShowDialog() == DialogResult.OK)
        libro.SaveAs(dialogoGuardar.FileName);
}

private void Calcular()
{
    if (libro.Worksheets.Count > 0)
        libro.Worksheets.Delete(1);
    libro.AddWorksheet();
    try
    {
        nCapas = textBoxEspesores.Lines.Length;
        espesores = new double[nCapas];
        indices = new double[nCapas];
        angulos = new double[textBoxAngulos.Lines.Length];
        for (int i = 0; i < nCapas; i++)
        {
            espesores[i] = Convert.ToDouble(textBoxEspesores.Lines[i],
                formato) / 1000;
            indices[i] = Convert.ToDouble(textBoxIndices.Lines[i],
                formato);
        }

        capaFSS = Convert.ToInt32(numericUpDownCapaFSS.Text);
        grosorFSS = Convert.ToDouble(textBoxGrosorFSS.Text, formato) /
            1e6;
        separacionFSS = Convert.ToDouble(textBoxSeparacionFSS.Text,
            formato) / 1000;

        capaFSS2 = Convert.ToInt32(numericUpDownCapaFSS2.Text);
        grosorFSS2 = Convert.ToDouble(textBoxGrosorFSS2.Text, formato) /
            1e6;
        separacionFSS2 = Convert.ToDouble(textBoxSeparacionFSS2.Text,
            formato) / 1000;

        fMax = Convert.ToDouble(textBoxFMax.Text, formato) * 1e9;
        fMin = Convert.ToDouble(textBoxFMin.Text, formato) * 1e9;
        double pasoFrec = (fMax - fMin) / nPuntos;

        libro.Worksheet(1).Cell(1, 1).Value = "Frecuencia (GHz)";
        for (int i = 0; i < frecuencias.Length; i++)
        {
            frecuencias[i] = fMin + pasoFrec * i;
        }
    }
}

```

```

        libro.Worksheet(1).Cell(i+2, 1).Value = frecuencias[i]/1e9;
    }

    zedGraphControl.GraphPane.CurveList.Clear();
    int color;
    int columna = 1;
    for (int i = 0; i < angulos.Length; i++)
    {
        angulos[i] = Convert.ToDouble(textBoxAngulos.Lines[i],
            formato);
        color = i + 2;
        if (color >= colores.Length)
            color = color - colores.Length + 2;
        if (checkBoxTE.Checked)
        {
            columna++;
            libro.Worksheet(1).Cell(1, columna).Value =
                angulos[i].ToString() + " ⊥";
            double[] S21TE = CalcularMulticapa(angulos[i],
                checkBoxFSS2.Checked, true);
            for (int j = 0; j < S21TE.Length; j++)
                libro.Worksheet(1).Cell(j+2, columna).Value =
                    S21TE[j];
            ActualizarGrafica(zedGraphControl, angulos[i].ToString()
                + " ⊥", frecuencias, S21TE, true, colores[color]);
        }
        if (checkBoxTM.Checked)
        {
            columna++;
            libro.Worksheet(1).Cell(1, columna).Value =
                angulos[i].ToString() + " ||";
            double[] S21TM = CalcularMulticapa(angulos[i],
                checkBoxFSS2.Checked, false);
            for (int j = 0; j < S21TM.Length; j++)
                libro.Worksheet(1).Cell(j + 2, columna).Value =
                    S21TM[j];
            ActualizarGrafica(zedGraphControl, angulos[i].ToString()
                + " ||", frecuencias, S21TM, false, colores[color]);
        }
    }
}
catch
{
    MessageBox.Show("Formato de datos incorrecto", "Error");
}
}

private void buttonCargar_Click(object sender, EventArgs e)
{
    string fichero = ElegirFichero();
    if (fichero!="")
        CargarVentana(fichero);
}

private void buttonActualizar_Click(object sender, EventArgs e)
{
    Calcular();
}

private void checkBoxFSS_CheckedChanged(object sender, EventArgs e)
{
    Calcular();
}

```

```
    }  
  
    private void checkBoxTE_CheckedChanged(object sender, EventArgs e)  
    {  
        Calcular();  
    }  
  
    private void checkBoxTM_CheckedChanged(object sender, EventArgs e)  
    {  
        Calcular();  
    }  
  
    private void buttonGuardar_Click(object sender, EventArgs e)  
    {  
        GuardarVentana();  
    }  
  
    private void buttonGuardarMedida_Click(object sender, EventArgs e)  
    {  
        GuardarMedida();  
    }  
} }  
}
```

Anexo 2. Código MATLAB

```
clear all
frec=1.8e9;%frecuencia para calcular el mínimo
global eta0;
eta0=120*pi;
nV=2.65; %Indice del vidrio
nVG=2.65;

%capas que componen la ventana
nCapas1=[nV]';
dCapas1=[4e-3]';
alfaCapas1=zeros(size(nCapas1));
nCapas2=[1 nV]';
dCapas2=[14e-3 4e-3]';
alfaCapas2=zeros(size(nCapas2));
nCapas3=[1 nV]';
dCapas3=[14e-3 4e-3]';
alfaCapas3=zeros(size(nCapas3));

%cálculo impedancia entrada
Zi=impEntrada(eta0, nCapas3(length(nCapas3)), alfaCapas3(length(nCapas3)),
frec, dCapas3(length(nCapas3)));%última capa
for i=length(nCapas3)-1:-1:1
    Zi=impEntrada(Zi, nCapas3(i), alfaCapas3(i), frec, dCapas3(i));
end

%admitancia entre condensador FSS e impedancia calculada
ysA=1/Zi;
syms C2 C1 real
yA=ysA+(2*pi*frec*C2*1i);

Zi=1/yA;

for i=length(nCapas2):-1:1
    Zi=impEntrada(Zi, nCapas2(i), alfaCapas2(i), frec, dCapas2(i));
end

%calculo admitancia segunda FSS
ysB=1/Zi;
yB=ysB+(2*pi*frec*C1*1i);

Zi=1/yB;

for i=length(nCapas1):-1:1
    Zi=impEntrada(Zi, nCapas1(i), alfaCapas1(i), frec, dCapas1(i));
end

[cond2,cond1]=solve(Zi-eta0,[C2 C1])

%%
%ahora con C1 y C2 y manteniendo fija d calcularemos 'a' de cada FSS
d=100e-6;
d2=100e-6;
```

```

eps0=8.85e-12;
nv=2.68;
epseff=0.5*(1+nv^2);
neff=sqrt(epseff);
lambda=3e8/frec*neff;

%para 1.8GHz dos soluciones pero la primera es como si no hubiera ninguna
%FSS del valor tan pequeño q sale 'a'
%%C1=6.692241982543995e-15 y C2=2.769605509843570e-14;
C1=1.149752963579437e-13;
C2=2.526129425523507e-13;

syms a real
x=a*2*epseff*eps0/pi*log(1/sin(pi*d/(2*a)));
[a1]=solve(x-C1,a)
[a2]=solve(x-C2,a)

function Zi=impEntrada(ZL,n0,alfa, frec, L)
    global eta0;
    Z0=eta0/n0;
    gamma=(alfa+1i*(2*pi*n0/3e8)*frec);

    num=ZL+Z0*tanh(gamma*L);
    den=Z0+ZL*tanh(gamma*L);
    Zi=Z0*(num/den);
end

```