



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Diseñar y construir un diplexor que trabaje en la banda C con una frecuencia de 6 GHz para posteriormente realizar la escalabilidad del prototipo a la banda Ka para aplicaciones 5G

Autora: Gissela Alexandra Vega Trujillo

Director: Ing. Raúl Vinicio Haro Báez, MSc.

2022



AGENDA

1.- INTRODUCCIÓN

2.- OBJETIVOS

3.- MARCO TEÓRICO

4.- METODOLOGÍA

5.- PRUEBAS Y RESULTADOS

6.- CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



Mejora en la ejecución de diversas aplicaciones.



Comunicaciones móviles y satelitales.



La guía de onda rectangular.



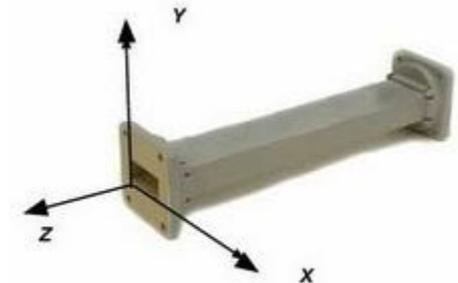
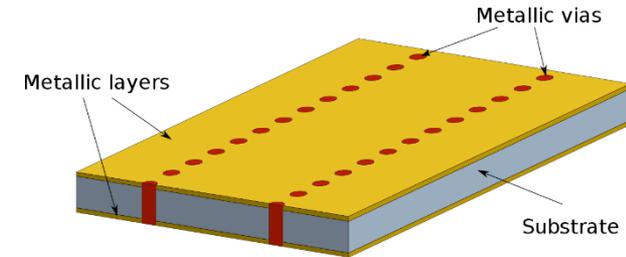
Tecnología SIW (Substrate Integrated Waveguide).

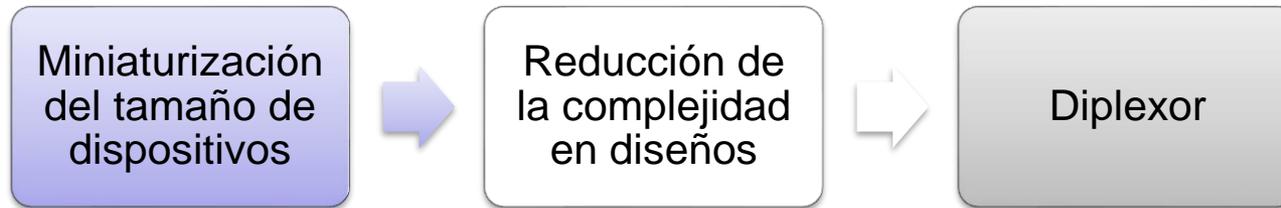


El diplexor es un candidato prometedor para servicios modernos de comunicación.

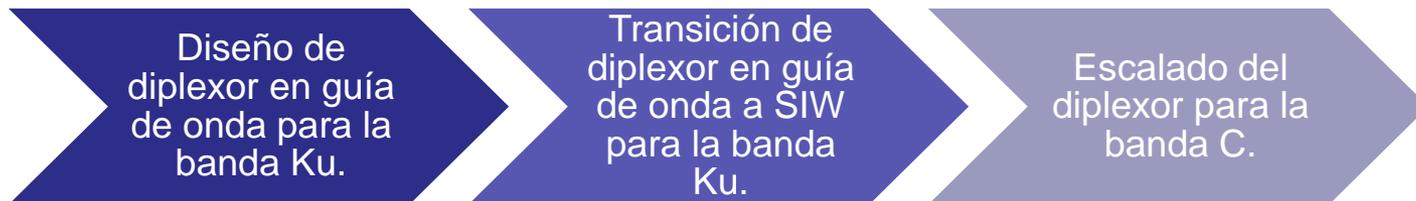


Realizar la transición del diplexor en guía de onda rectangular a SIW.





En el proyecto se realizará:



Objetivo General

Diseñar y construir un diplexor que trabaje en la banda C con una frecuencia de 6 GHz para posteriormente realizar la escalabilidad del prototipo a la banda Ka para aplicaciones 5G.

Objetivos Específicos

Averiguar sobre el funcionamiento de diplexores en tecnología SIW.

Establecer las especificaciones de diseño del diplexor.

Simular un diplexor mediante software de análisis electromagnético "CST".

Optimizar la respuesta del diplexor mediante las herramientas del software CST.

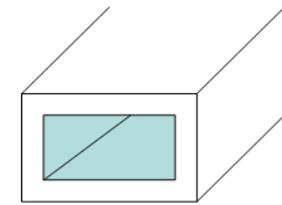
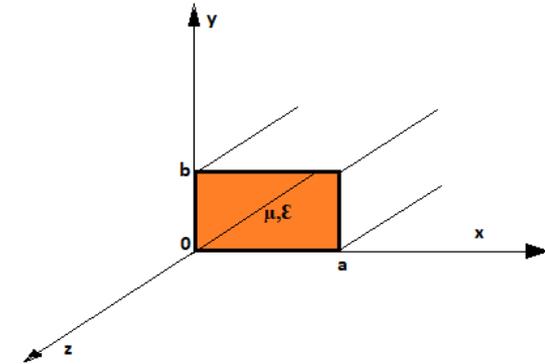
Realizar la conversión del diplexor en guía de onda a SIW.

Validar el funcionamiento del diplexor a partir de parámetros de transmisión y reflexión, para las frecuencias de rango de la banda C.

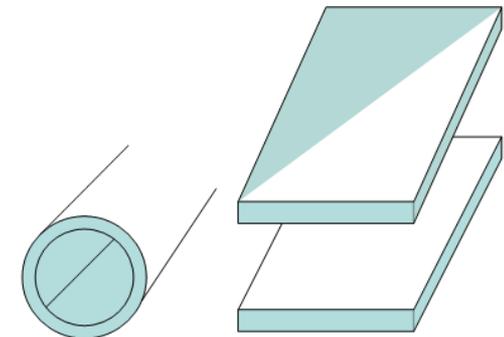
Analizar resultados mediante la comparación teórica y la simulación en CST.



| Banda de Frecuencia | Estándar de guía de onda rectangular | Límites de Frecuencia (GHz) | Dimensiones (mm) |
|---------------------|--------------------------------------|-----------------------------|-------------------|
| F | WR-159 | 4.9 a 7.05 | 40.386 x 20.193 |
| C | WR-137 | 5.85 a 8.2 | 34.8488 x 15.7988 |
| Ku | WR-62 | 12.4 a 18 | 15.7988 x 7.8994 |
| K | WR-51 | 15 a 22 | 12.954 x 6.477 |
| K | WR-42 | 18 a 26.5 | 10.668 x 4.318 |
| Ka | WR-28 | 26.5 a 40 | 7.112 x 3.556 |



a) Guía de onda rectangular



b) Guía de onda circular

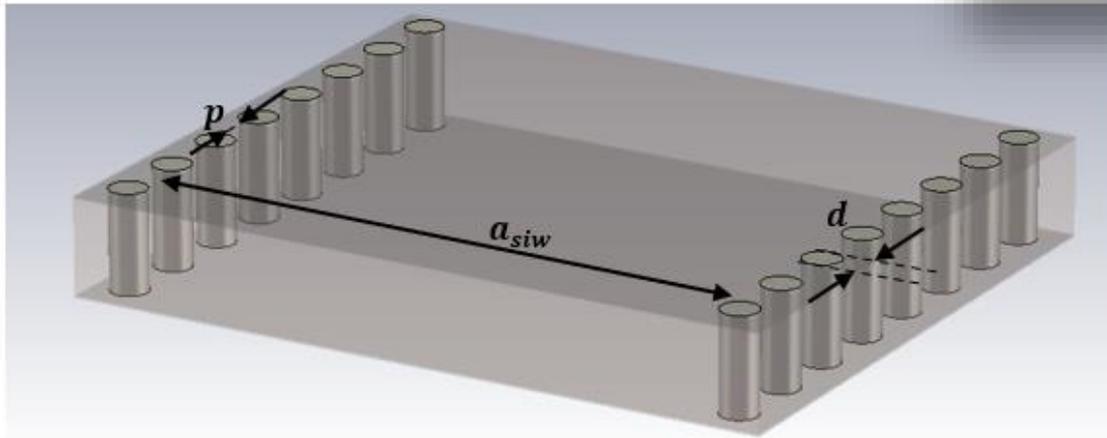
c) Guía de placas

Reglas de Diseño

$$p \leq 2d$$

$$d < \frac{\lambda_g}{5}$$

Minimizar el número de vías



Ecuación de transición a SIW

$$W_{eff} = - \frac{d^2}{0.95 * p}$$

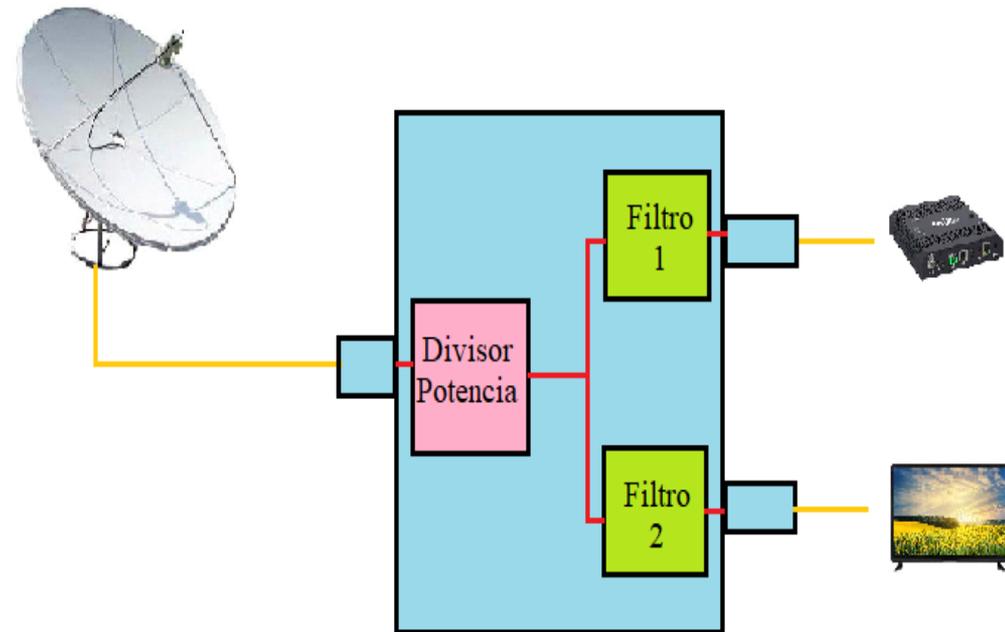


Diplexor

Permite que dos dispositivos compartan el mismo medio de comunicación.

El diplexor no debe confundirse con un duplexor.

Separa las bandas de interés y las transmite por diferentes salidas con la misma atenuación.



DISEÑO DE FILTROS

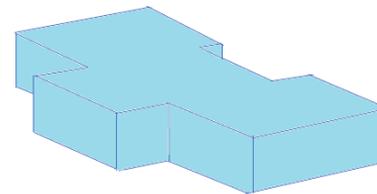
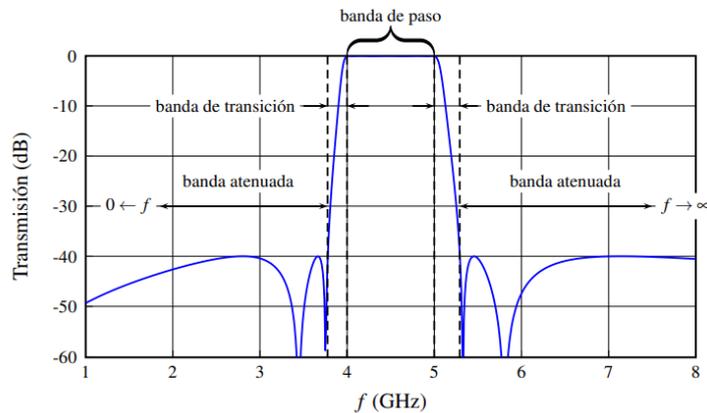
- Especificaciones de diseño.
- Diseño de filtro pasa bajo.
- Escalado y conversión.

DIVISOR DE POTENCIA

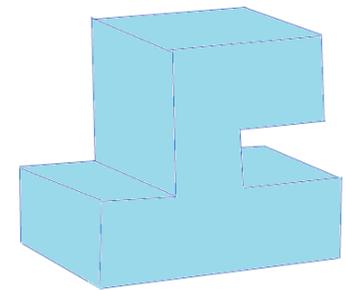
- Elección del plano E o H.
- Divisor en T.
- Colocación de iris que mejoren la respuesta del divisor.

DIPLEXOR

- Unión de filtros y el divisor de potencia de 3 puertos.

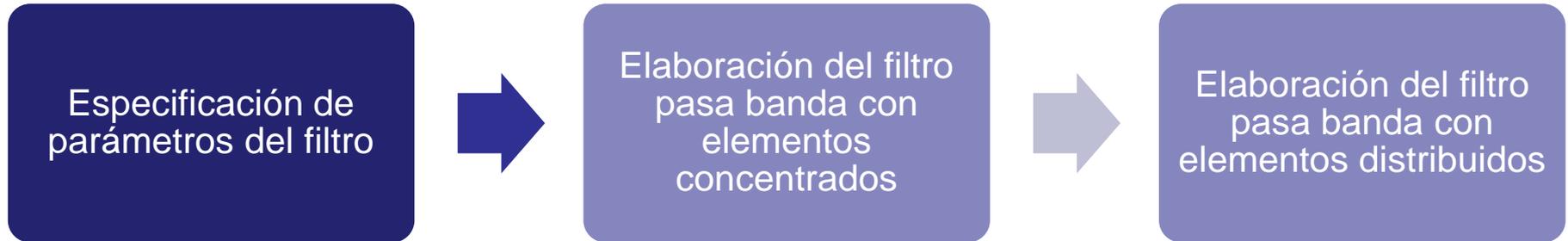


a) Plano H



b) Plano E

Etapas de Diseño de Filtros Pasa banda

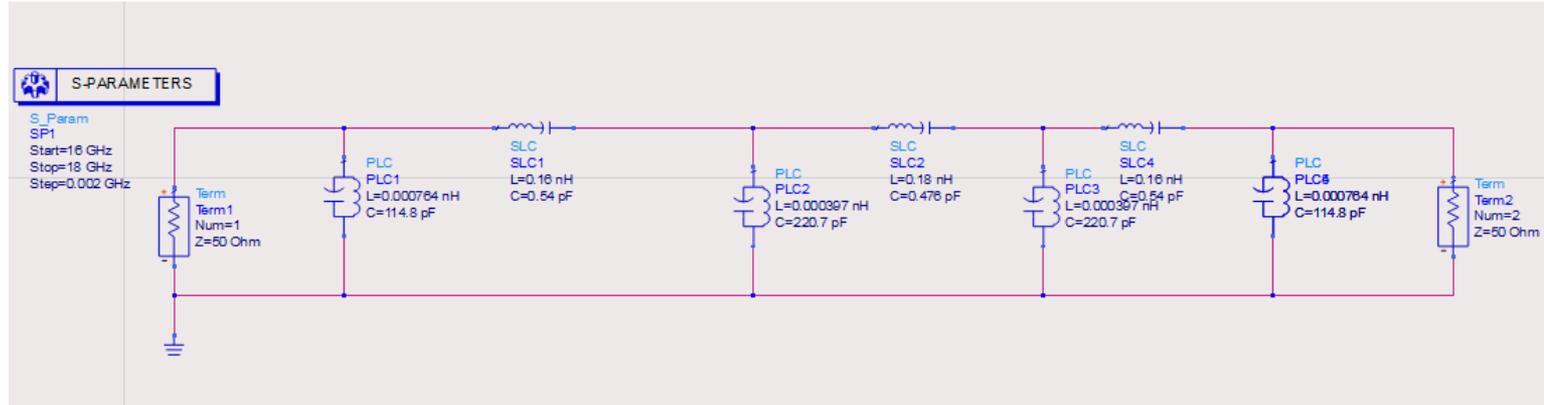


| Especificación | Valor |
|------------------------------|---|
| Frecuencias de corte | $f_{c1} = 16.3 \text{ GHz}$ y $f_{c2} = 17.7 \text{ GHz}$ |
| Orden del filtro | $N = 7$ |
| Pérdidas de retorno | 20 dB |
| Tipo de respuesta del filtro | Chebyshev |
| Ancho de los iris | 2 mm |

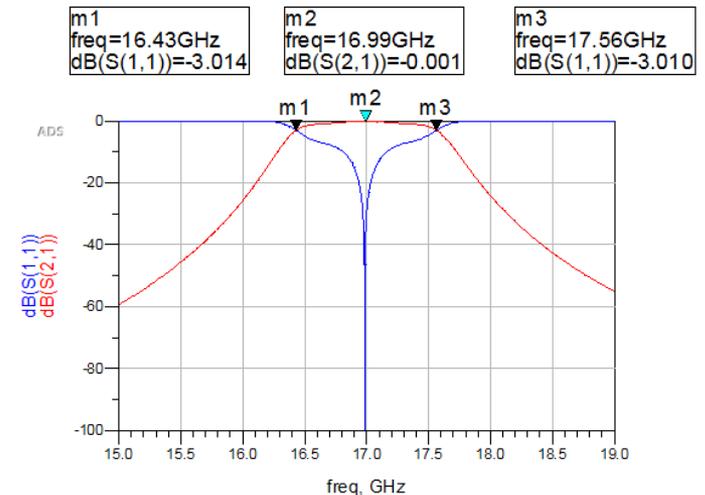
Valores de elementos para prototipos de filtro de paso bajo normalizado

| g_1 | g_2 | g_3 | g_4 | g_5 | g_6 | g_7 |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1.0097 | 1.4368 | 1.9414 | 1.6216 | 1.9414 | 1.4368 | 1.0097 |

Filtro pasa banda con elementos concentrados



| Resonadores | Inductor (nH) | Capacitor (pF) |
|-------------------|--------------------|----------------|
| Paralelo 1 | $L_1 = 7.64e^{-4}$ | $C_1 = 114.8$ |
| Serie 1 | $L_2 = 0.16$ | $C_2 = 0.54$ |
| Paralelo 2 | $L_3 = 3.97e^{-4}$ | $C_3 = 220.7$ |
| Serie 2 | $L_4 = 0.18$ | $C_4 = 0.476$ |
| Paralelo 3 | $L_5 = 3.97e^{-4}$ | $C_5 = 220.7$ |
| Serie 3 | $L_6 = 0.16$ | $C_6 = 0.54$ |
| Paralelo 4 | $L_7 = 7.64e^{-4}$ | $C_7 = 114.8$ |



Cálculo de Inversores de Impedancia

$$\frac{K_1}{Z_0} = \sqrt{\frac{\pi\Delta}{2g_0g_1}} \quad \frac{K_i}{Z_0} = \frac{\pi\Delta}{2\sqrt{g_{i-1}g_i}} \quad i = 2, \dots, N$$

$$\frac{K_{N+1}}{Z_0} = \sqrt{\frac{\pi\Delta}{2g_Ng_{N+1}}}$$

$$\Delta = \frac{\lambda_{g1} - \lambda_{g2}}{\lambda_{g0}}$$

Iris electromagnético

$$jX_s = \frac{1 - S_{12} + S_{11}}{1 - S_{11} + S_{12}}$$

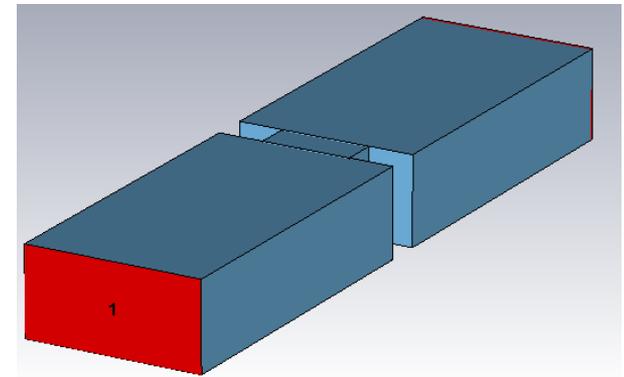
$$jX_p = \frac{2S_{12}}{(1 - S_{11})^2 - S_{12}^2}$$

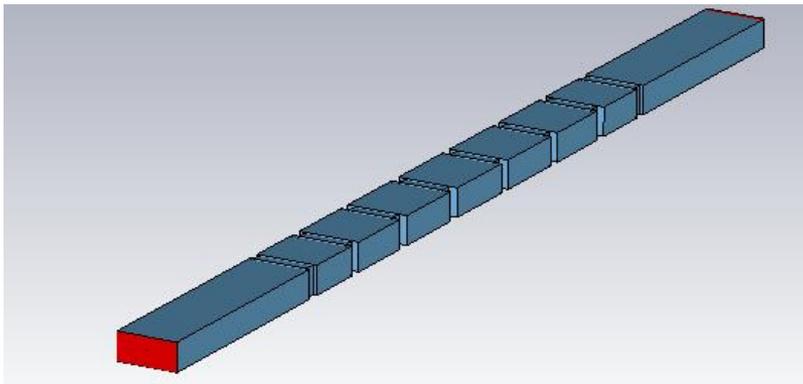
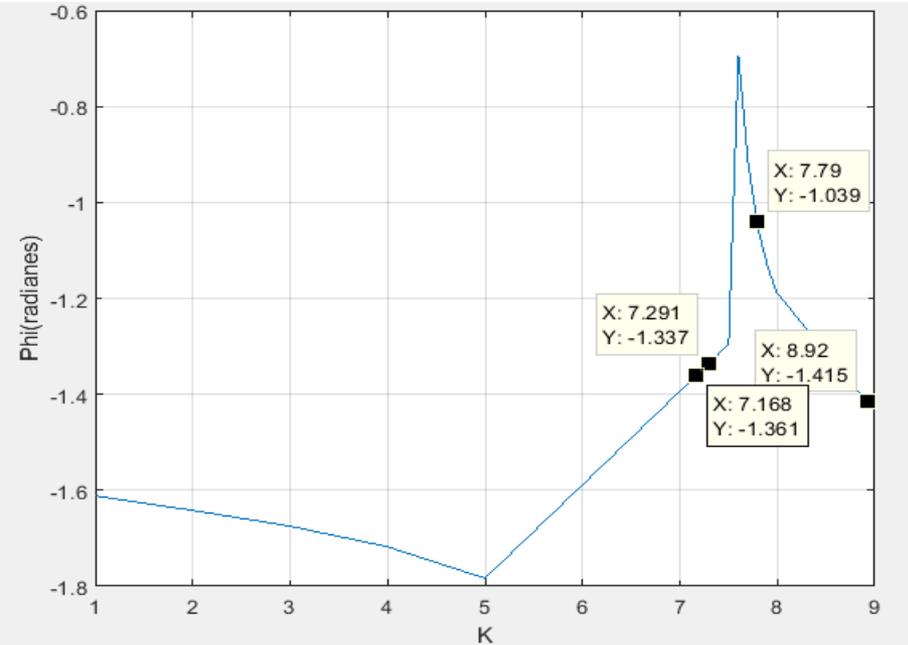
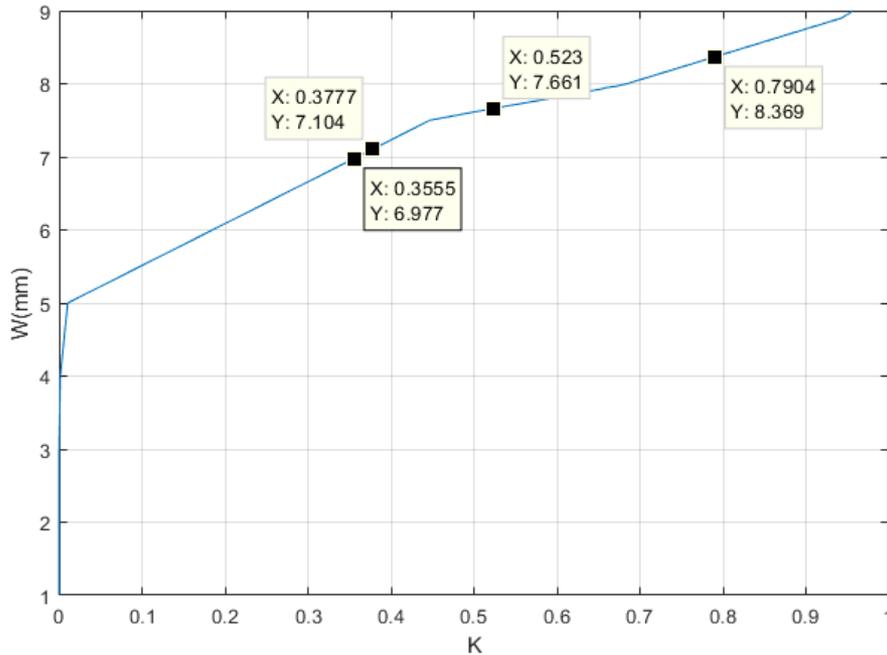
$$K = \left| \tan \left[\frac{\phi}{2} + \arctan(X_s) \right] \right|$$

$$\phi = -\arctan(2X_p + X_s) - \arctan(X_s)$$

Valores de los inversores de impedancias

| K_1 | K_2 | K_3 | K_4 | K_5 | K_6 | K_7 | K_8 |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.7900 | 0.5232 | 0.3776 | 0.3552 | 0.3552 | 0.3776 | 0.5232 | 0.7900 |



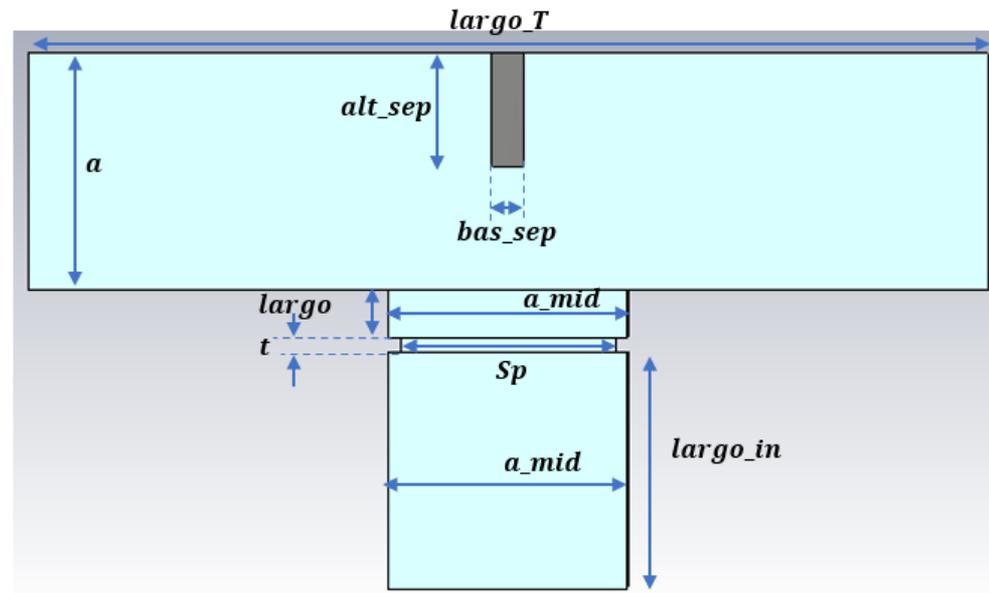


| | FILTRO 1 | FILTRO 2 |
|-------------------|---------------|---------------|
| Parámetro | Longitud [mm] | Longitud [mm] |
| Iris 1 y 8 | 8.66508 | 8.63545 |
| Iris 2 y 7 | 7.71756 | 7.71905 |
| Iris 3 y 6 | 7.31312 | 7.33697 |
| Iris 4 y 5 | 7.15143 | 7.20743 |
| Res 1 y 7 | 11.0332 | 11.0737 |
| Res 2 y 6 | 12.9002 | 12.6719 |
| Res 3 y 5 | 13.6297 | 13.3399 |
| Res 4 | 13.6823 | 13.6266 |

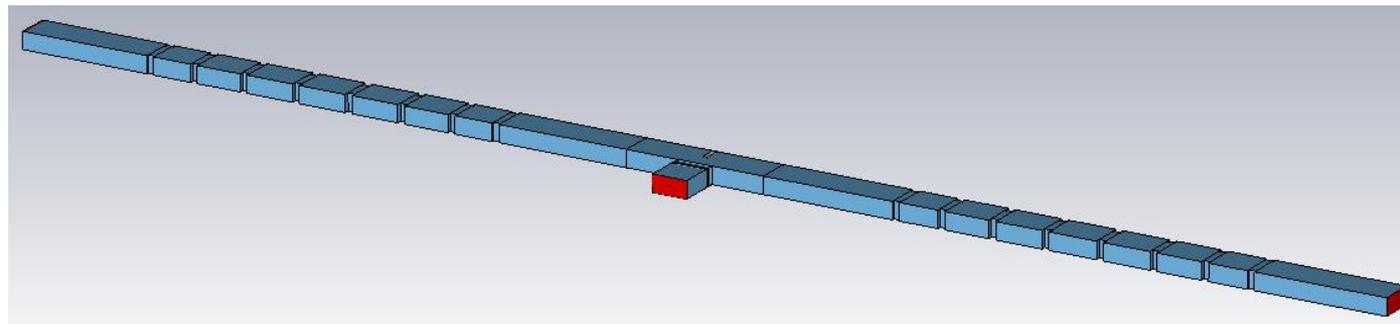
RESULTADOS DESPUÉS DE LA OPTIMIZACIÓN



| Parámetro | Longitud [mm] |
|-------------|---------------|
| Sp | 4.51061 |
| alt_sep | 4.79465 |
| bas_sep | 1.27628 |
| t | 0.62484 |
| $largo$ | 2.00 |
| a_mid | 5.00 |
| $largo_T$ | 20.00 |
| $largo_in$ | 10.00 |
| b | 5.00 |
| a | 10.00 |



Diplexor finalizado en guía de onda



Ecuaciones y cálculos de transición

$$d < \frac{3 \cdot 10^8}{\frac{17 \cdot 10^9}{5}} \rightarrow d < 3.5294 \text{ mm} \rightarrow d = 0.6 \text{ mm}$$

$$b \leq 2d \rightarrow b \leq 2(0.6 \text{ mm}) \rightarrow b = 1.2 \text{ mm}$$

$$W_{eff} = \frac{W_{guia}}{\sqrt{\epsilon}} \rightarrow W_{eff} = \frac{15.7988 \text{ mm}}{\sqrt{3.5}}$$

$$\rightarrow W_{eff} = 8.4448 \text{ mm}$$

$$W_{SIW} = W_{eff} + \frac{d^2}{0.95 * b} \rightarrow W_{SIW} = 8.7606 \text{ mm}$$

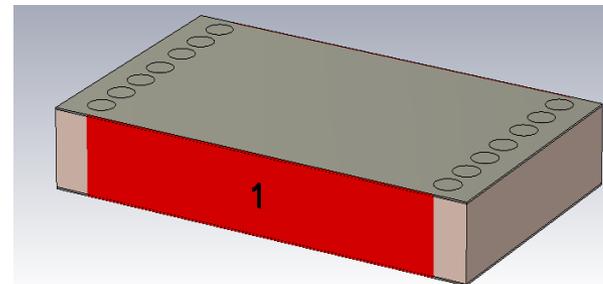
$$\lambda_{TE_{10}} = \frac{\frac{\lambda_c}{\sqrt{\epsilon}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{cTE_{10}}}{f_c}\right)^2}} \rightarrow \lambda_{TE_{10}} = 11.371 \text{ mm}$$

Características del sustrato

| Parámetro | Valor |
|--|--------|
| Constante dieléctrica (ϵ_r) | 3.50 |
| Factor de disipación ($\tan \delta$) | 0.0018 |
| Grosor del sustrato (h) [mm] | 1.52 |
| Grosor del conductor (Cu) [mm] | 0.035 |

Dimensiones de la guía

| Parámetro | Valor [mm] |
|-----------|-----------------------|
| Lambda | 11.371 |
| Alto | 1.52 |
| Ancho | 8.706 |
| Longitud | $\lambda_{TE_{10}}/2$ |

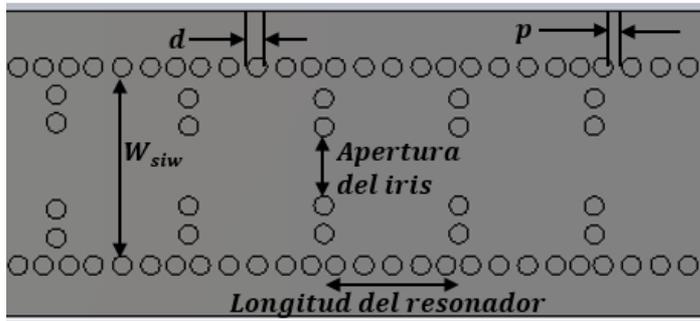
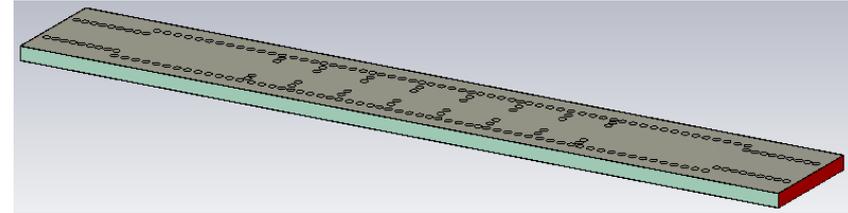


Guía de onda en SIW

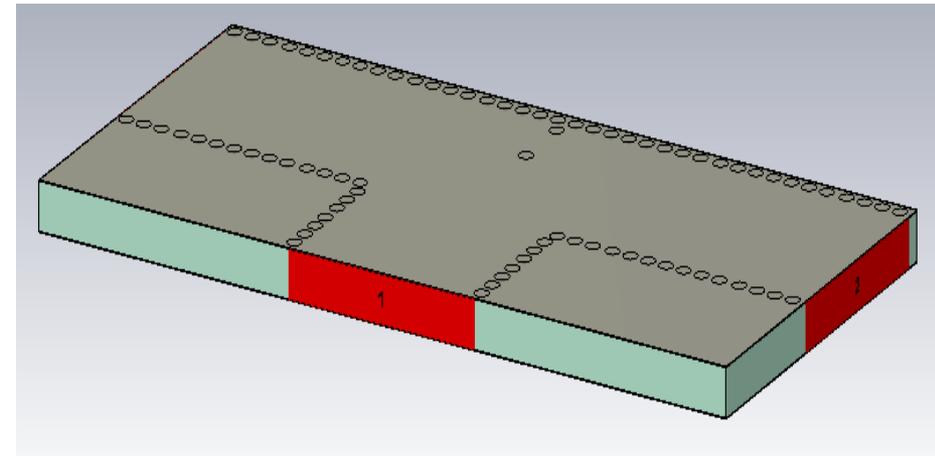
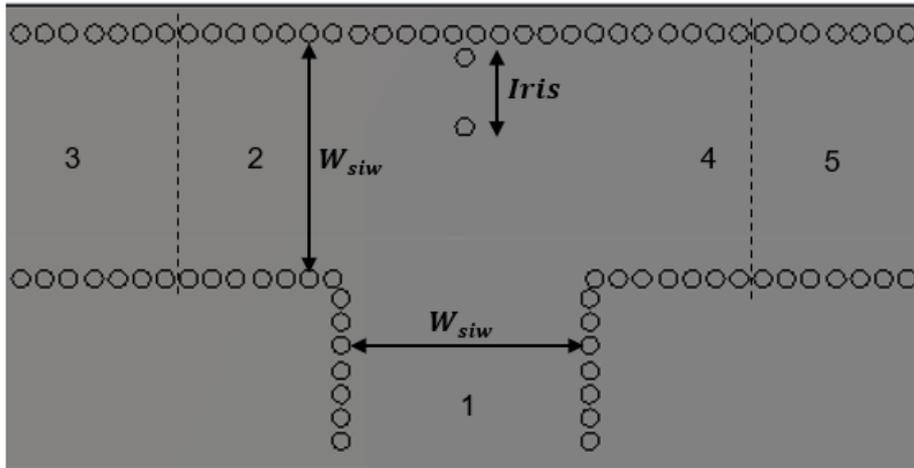


Se calculan las dimensiones del filtro en guía de onda para un valor de

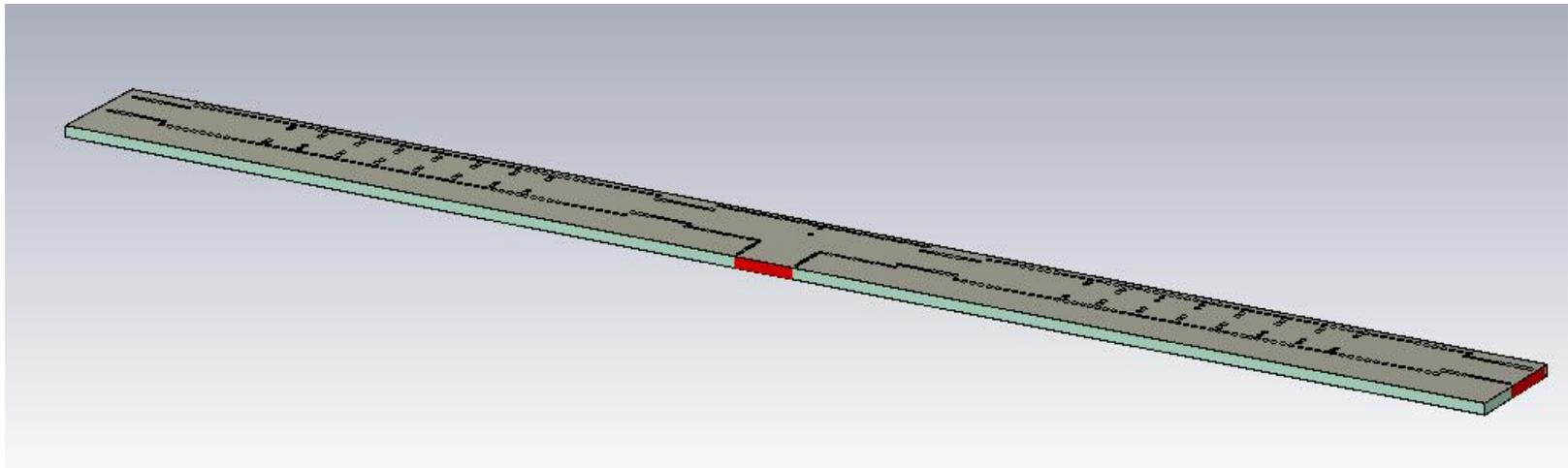
Transformar las dimensiones del filtro con la correspondiente a la constante dieléctrica del sustrato, en este caso del RF-35.



| Longitud [mm] | Dieléctrico $\epsilon=1$ | Sustrato RF-35 ($\epsilon=3.5$) |
|-----------------|--------------------------|-----------------------------------|
| a | 15.44 | 8.4448 |
| b | 2.32 | 1.52 |
| d | 1.18 | 0.6 |
| Iris 1 y 8 | 7.72 | 4.1265 |
| Iris 2 y 7 | 8.19 | 2.8918 |
| Iris 3 y 6 | 5.48 | 2.5978 |
| Iris 4 y 5 | 9.29 | 2.5550 |
| Resonador 1 y 7 | 5.13 | 4.1212 |
| Resonador 2 y 6 | 8.95 | 4.7733 |
| Resonador 3 y 5 | 6.87 | 4.8855 |
| Resonador 4 | 10.76 | 4.8909 |



Divisor de Potencia tipo T



Diplexor SIW sin transiciones

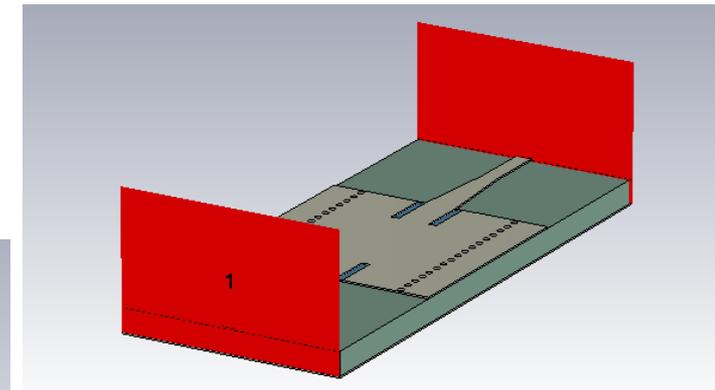
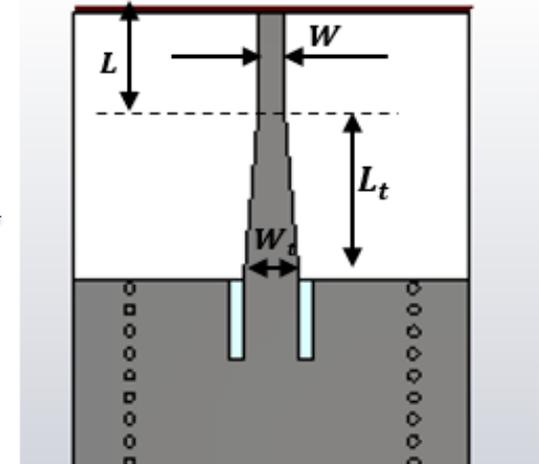
Transición tipo Taper

Parámetros para el cálculo

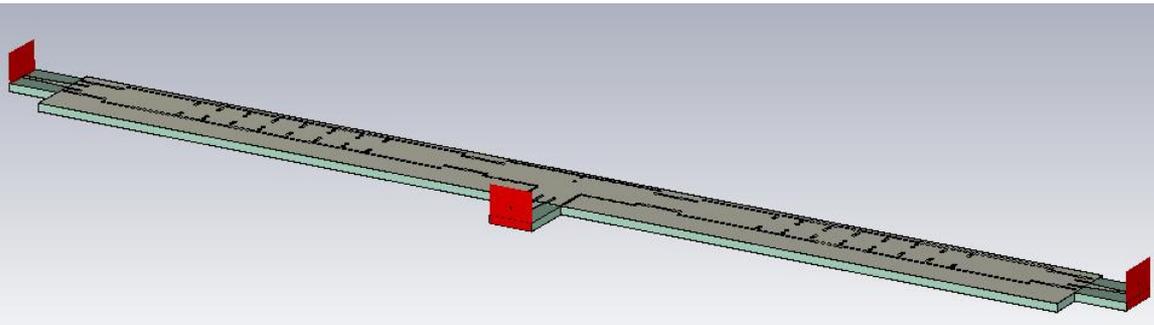
| Parámetros del sustrato | Valor |
|--------------------------------------|---------|
| Constante dieléctrica (ϵ) | 3.5 |
| Altura del sustrato | 1.52 mm |
| Frecuencia | 17 GHz |

Valores de la línea microstrip

| Parámetro | Longitud [mm] |
|-----------|---------------|
| W | 1.010000 |
| W_t | 1.982000 |
| L | 4.022710 |
| L_t | 5.826444 |



Diplexor con transiciones



Diplexor con filtros en diferentes frecuencias

| Especificación | Filtro 1 | Filtro 2 |
|---------------------------------|---------------------------------|----------|
| Frecuencia de corte 1 (f_1) | 16.2 GHz | 17.2 GHz |
| Frecuencia de corte 2 (f_2) | 16.4 GHz | 17.4 GHz |
| Frecuencia central (f_c) | 16.3 GHz | 17.3 GHz |
| Orden del filtro (N) | 5 | |
| Rizado (L_{AR}) | 0.05 dB | |
| Ancho iris (l) | 2 mm | |
| Tipo de guía | WR-51 (a= 12.954mm; b= 6.477mm) | |

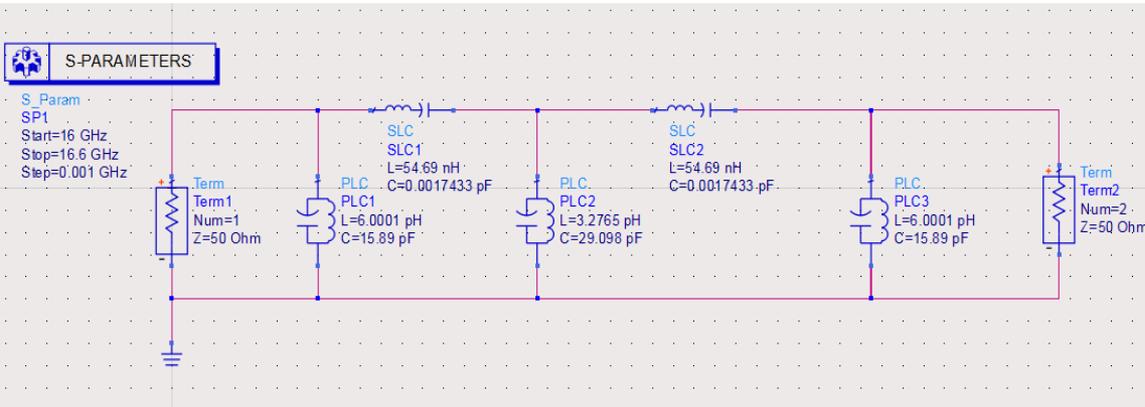
Especificaciones de diseño

| Valores de elementos para prototipo de filtro de paso bajo normalizado | | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| g_0 | g_1 | g_2 | g_3 | g_4 | g_5 | g_6 |
| 1.0000 | 0.9984 | 1.3745 | 1.8283 | 1.3745 | 0.9984 | 1.0000 |

| Resonadores | Filtro 1 | | Filtro 2 | |
|-------------|---------------------------|-------------------|---------------------------|-------------------|
| | Inductor | Capacitor [pF] | Inductor | Capacitor [pF] |
| Paralelo 1 | $L_1 = 6.0001 \text{ pH}$ | $C_1 = 15.89$ | $L_1 = 5.3265 \text{ pH}$ | $C_1 = 15.89$ |
| Serie 1 | $L_2 = 54.69 \text{ nH}$ | $C_2 = 0.0017433$ | $L_2 = 54.69 \text{ nH}$ | $C_2 = 0.0015476$ |
| Paralelo 2 | $L_3 = 3.2765 \text{ pH}$ | $C_3 = 29.098$ | $L_3 = 2.9087 \text{ pH}$ | $C_3 = 29.098$ |
| Serie 2 | $L_4 = 54.69 \text{ nH}$ | $C_4 = 0.0017433$ | $L_4 = 54.69 \text{ nH}$ | $C_4 = 0.0015476$ |
| Paralelo 3 | $L_5 = 6.0001 \text{ pH}$ | $C_5 = 15.89$ | $L_5 = 5.3265 \text{ pH}$ | $C_5 = 15.89$ |

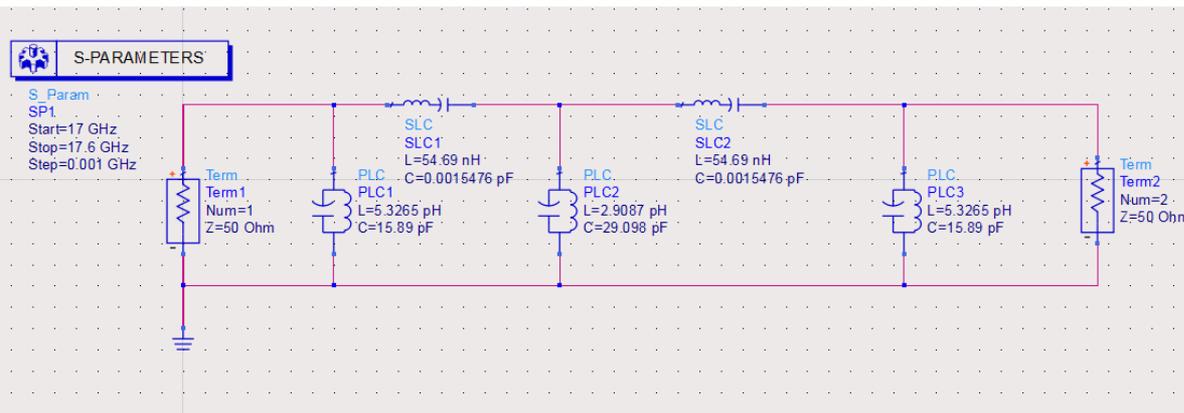
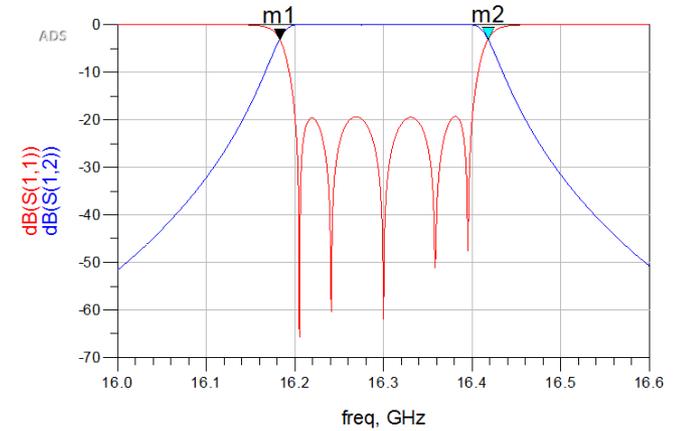
Resultados de los filtros

Filtros pasa banda



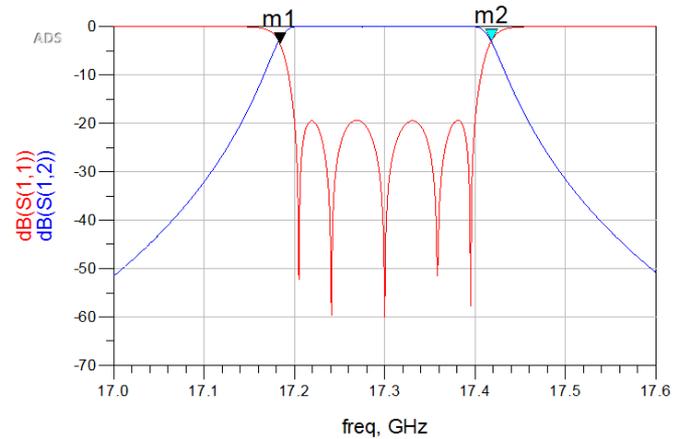
m1
freq=16.18GHz
dB(S(1,1))=-3.136

m2
freq=16.42GHz
dB(S(1,1))=-2.917



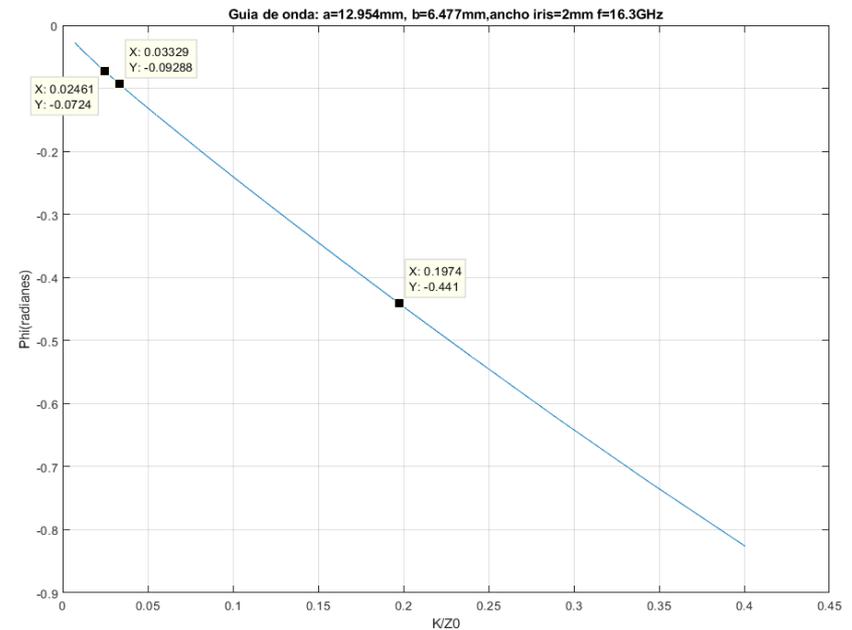
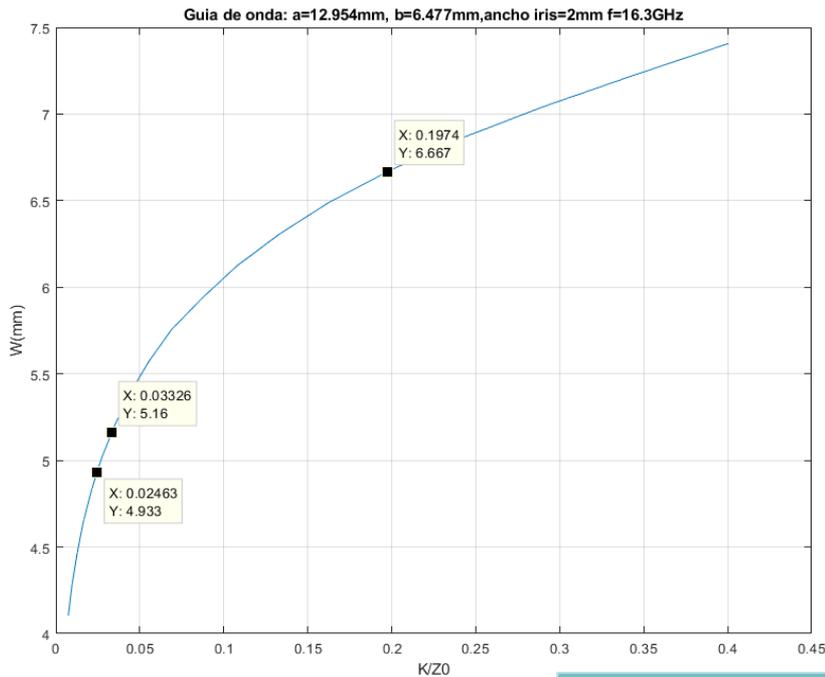
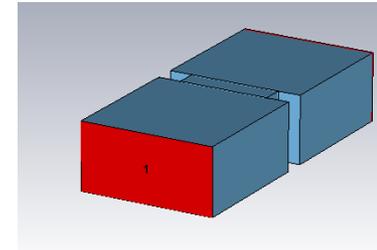
m1
freq=17.18GHz
dB(S(1,1))=-3.573

m2
freq=17.42GHz
dB(S(1,1))=-2.876



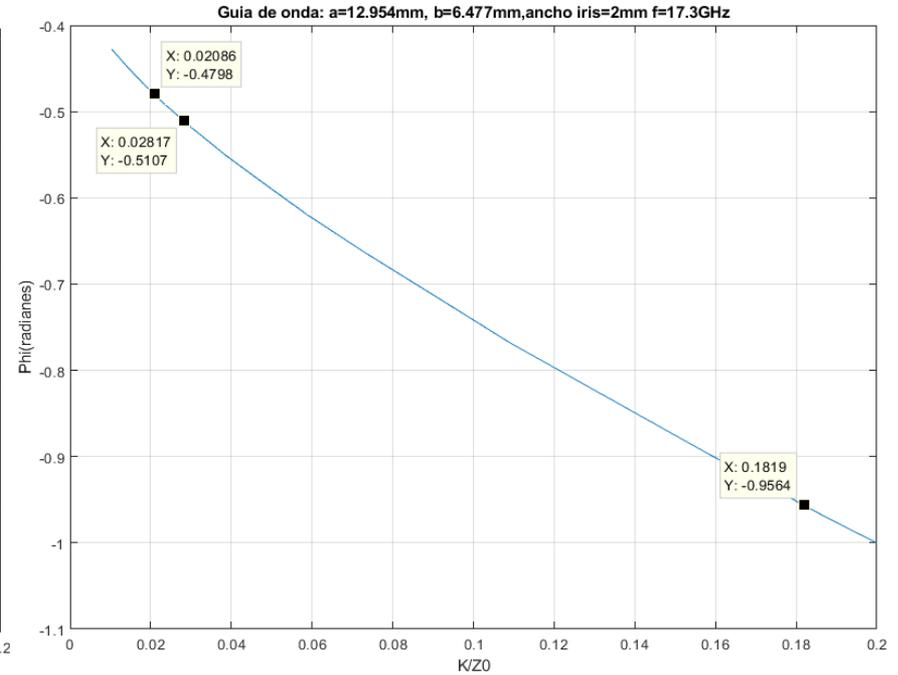
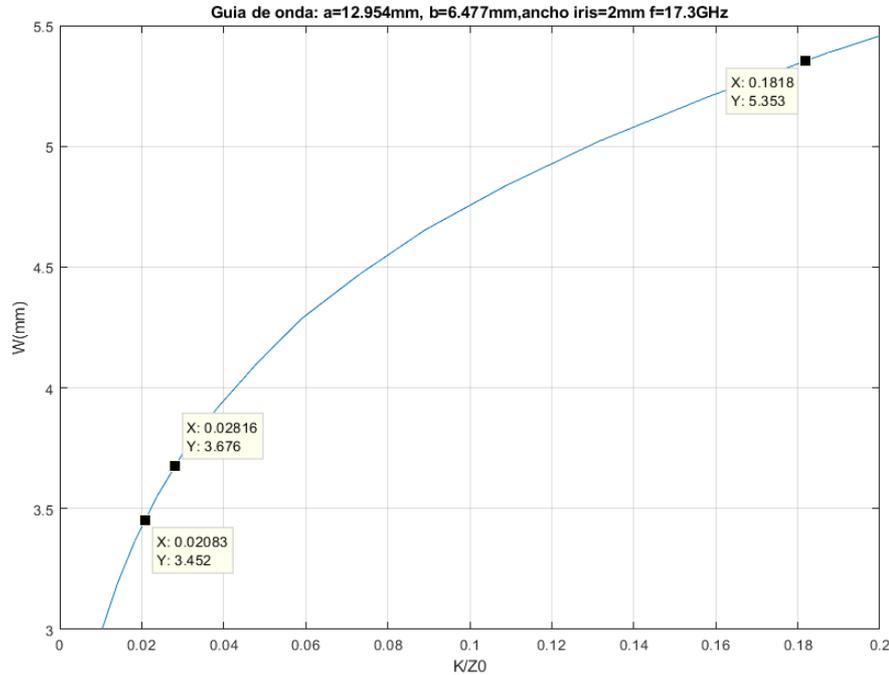
Valores de los inversores de impedancias

| Filtros | K_1 | K_2 | K_3 | K_4 | K_5 | K_6 |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| CH 1 | 0.1974 | 0.0332 | 0.0246 | 0.0246 | 0.0332 | 0.1974 |
| CH 2 | 0.1815 | 0.0281 | 0.0208 | 0.0208 | 0.0281 | 0.1815 |

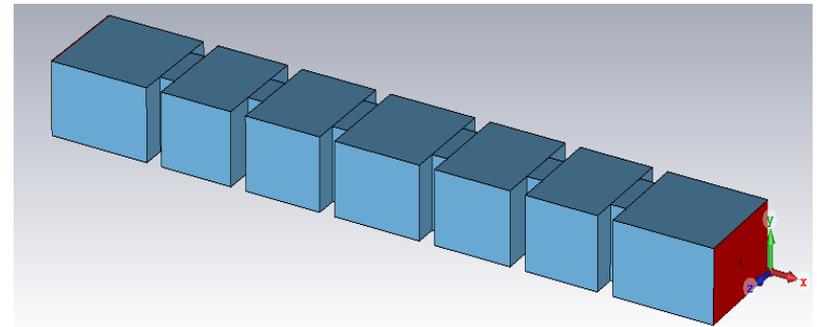


Gráficas para el filtro Canal 1

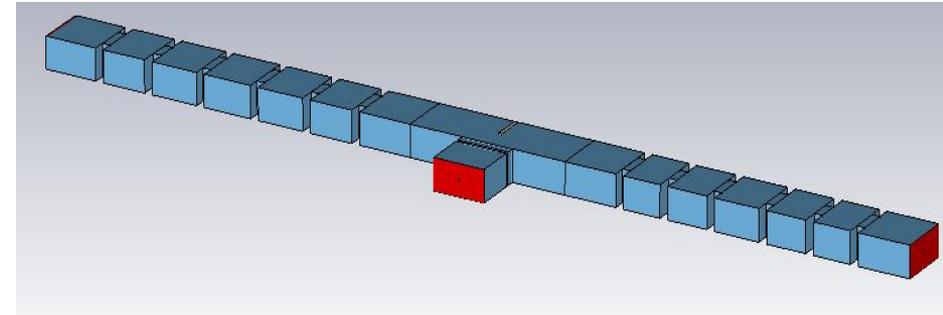




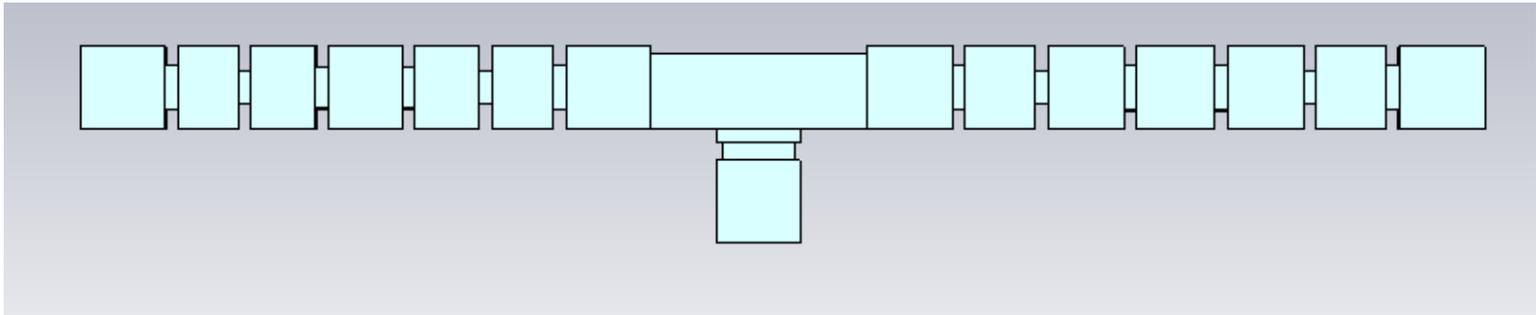
| FILTRO 1 | | FILTRO 2 |
|------------|---------------|---------------|
| Parámetro | Longitud [mm] | Longitud [mm] |
| Iris 1 y 6 | 6.90469 | 6.86677 |
| Iris 2 y 5 | 5.14187 | 4.96944 |
| Iris 3 y 4 | 7.14094 | 6.52638 |
| Res 1 y 5 | 10.8234 | 9.34687 |
| Res 2 y 4 | 11.6359 | 9.92685 |
| Res 3 | 12.0836 | 11.2683 |
| Guía 1 y 2 | 13.075 | 13.075 |



| Parámetro | Longitud [mm] |
|-------------|---------------|
| Sp | 4.98041 |
| alt_sep | 7.19345 |
| bas_sep | 0.873887 |
| t | 0.645063 |
| $largo$ | 2 |
| a_mid | $a/2$ |
| $largo_T$ | 20 |
| $largo_in$ | 10 |
| b | 6.477 |
| a | 12.954 |

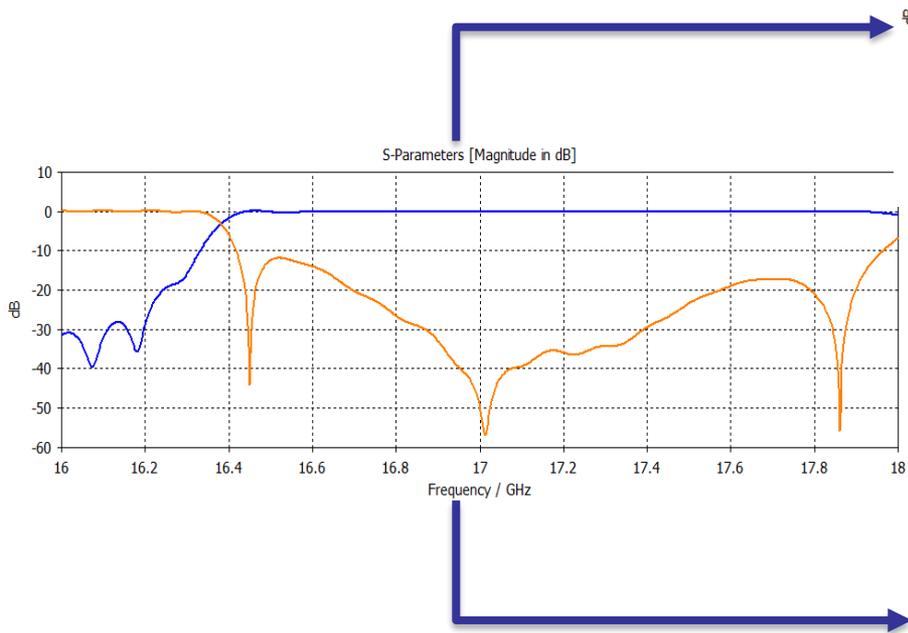


Diplexor sin optimizar

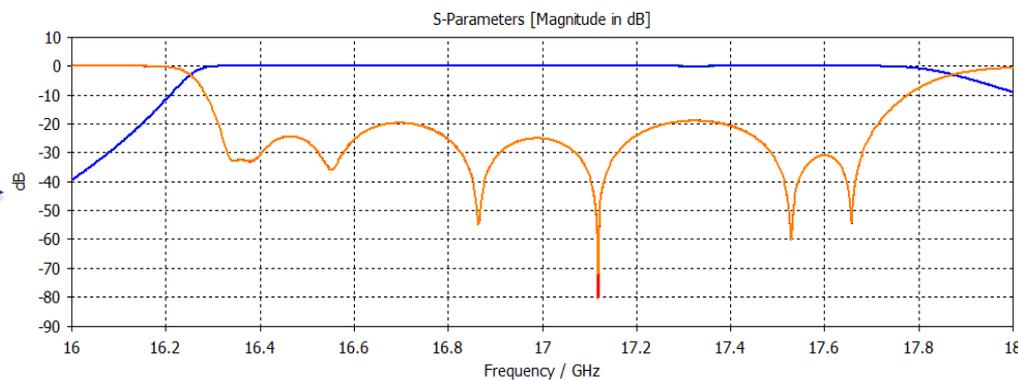
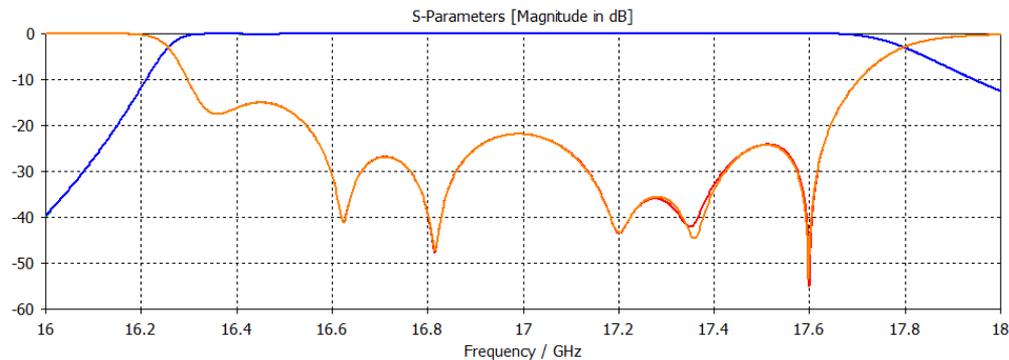


Diplexor optimizado

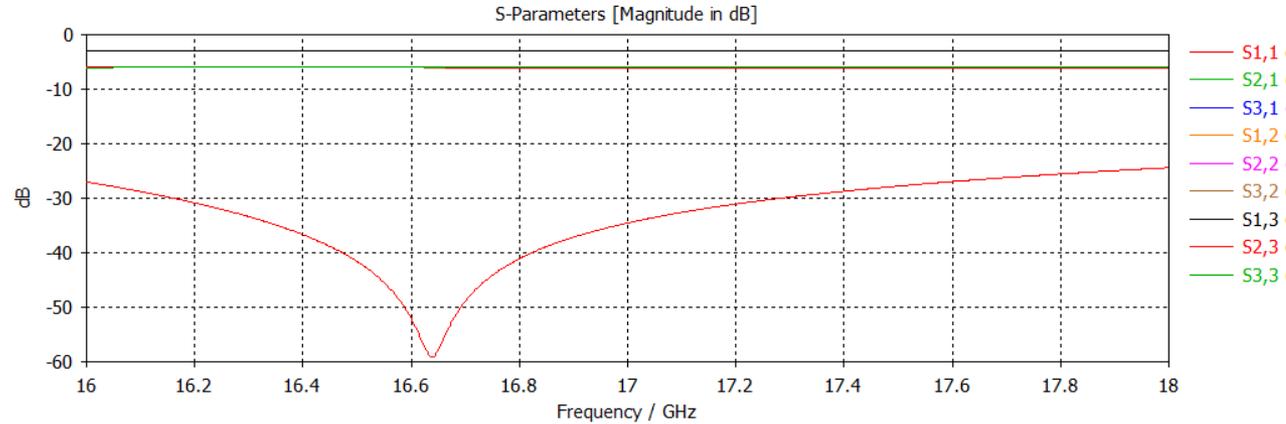
Filtro sin optimizar



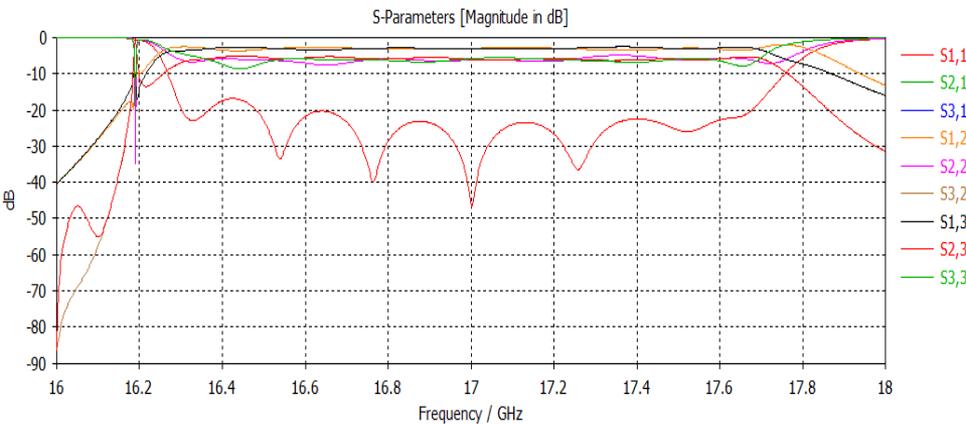
Filtros Optimizados



Divisor de Potencia

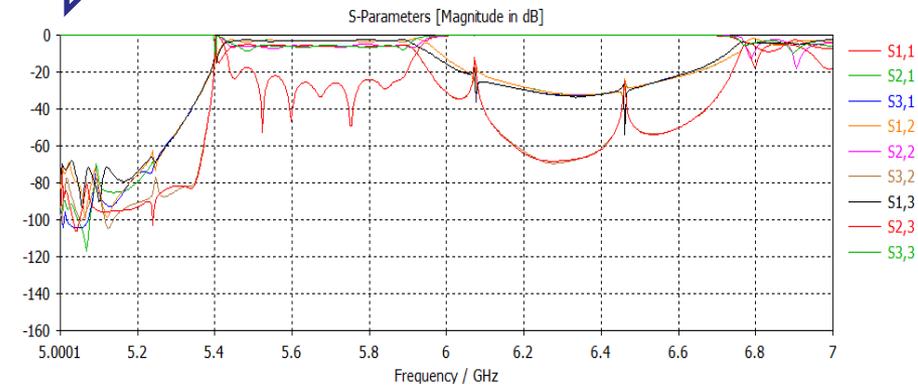


Diplexor banda Ku

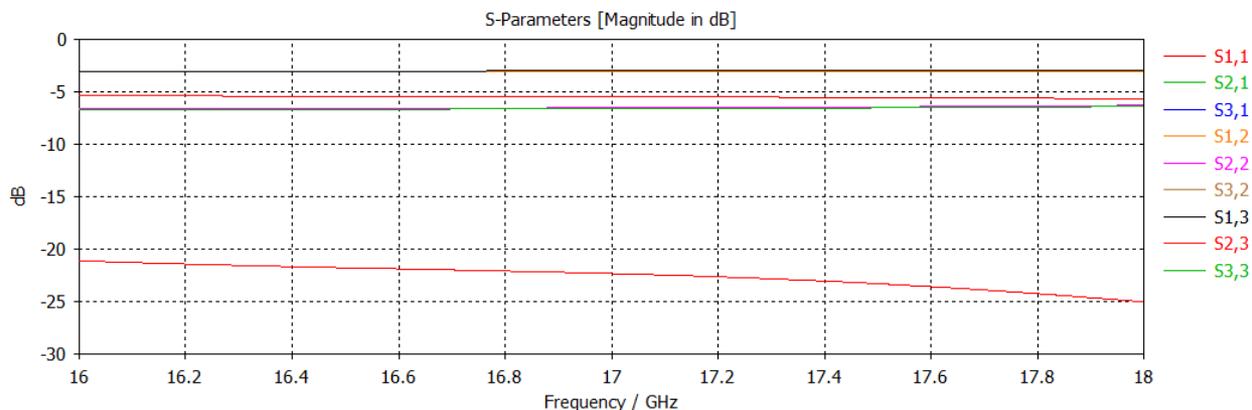


Escalado

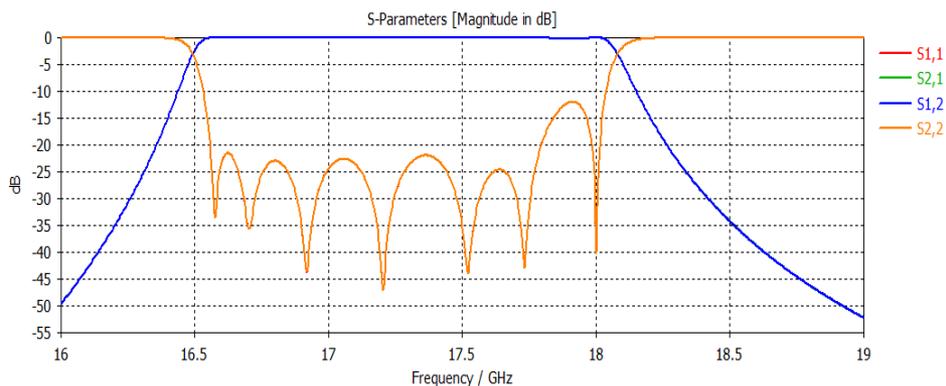
Diplexor banda C



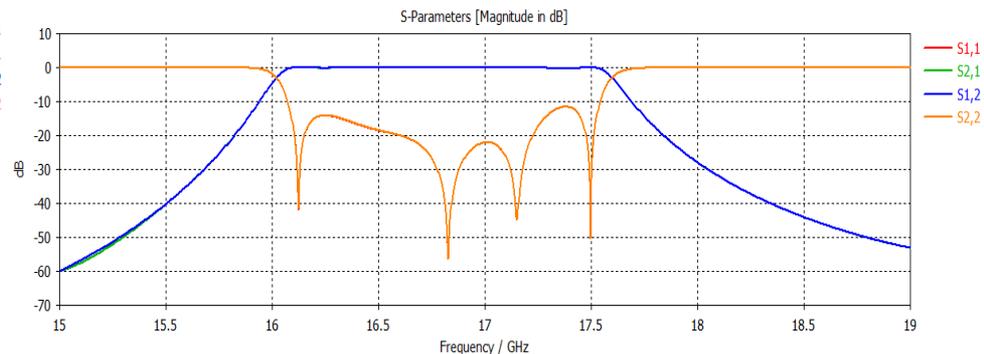
Divisor de Potencia SIW



Filtro 1 SIW



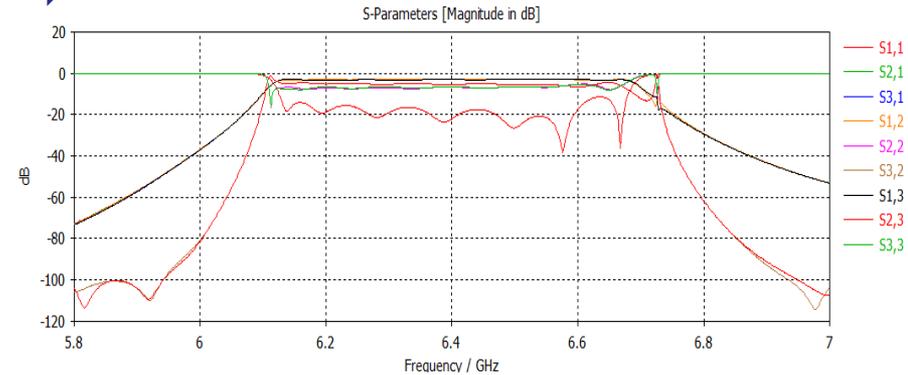
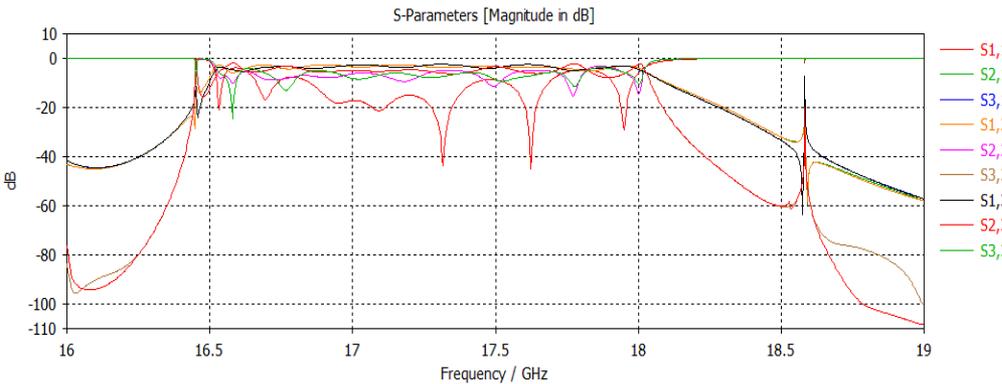
Filtro 2 SIW



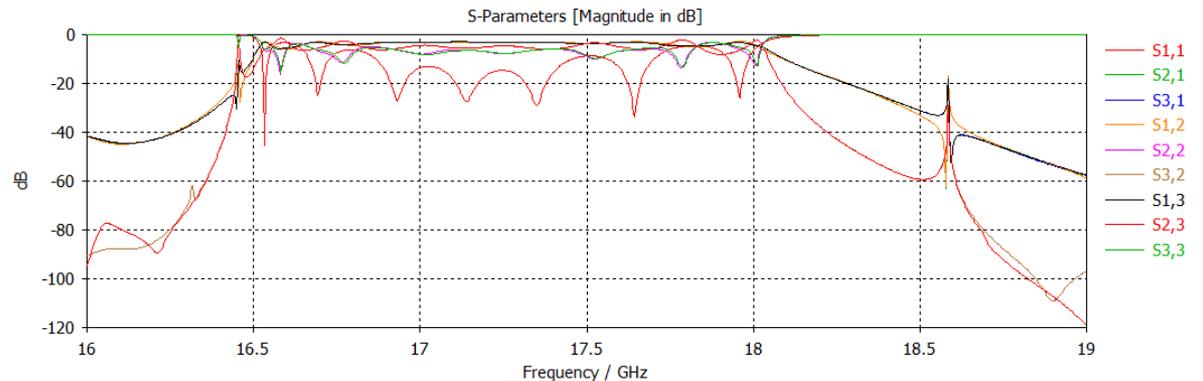
Diplexor SIW banda Ku

Escalado

Diplexor SIW banda C



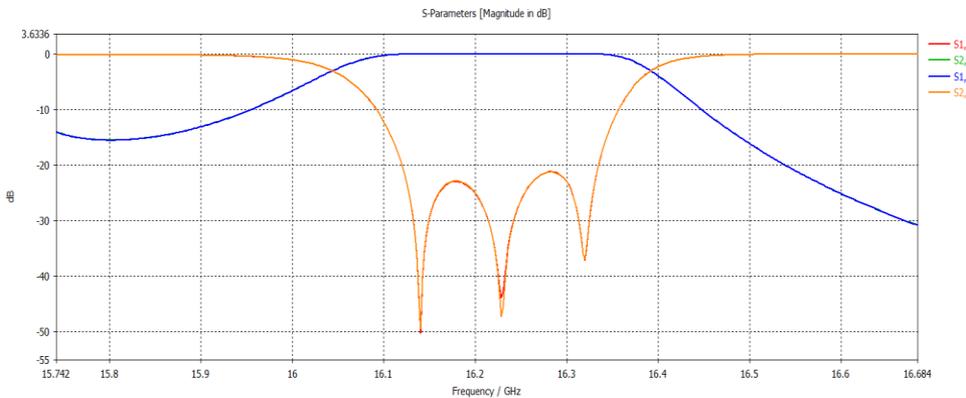
Diplexor SIW con transición tipo Taper



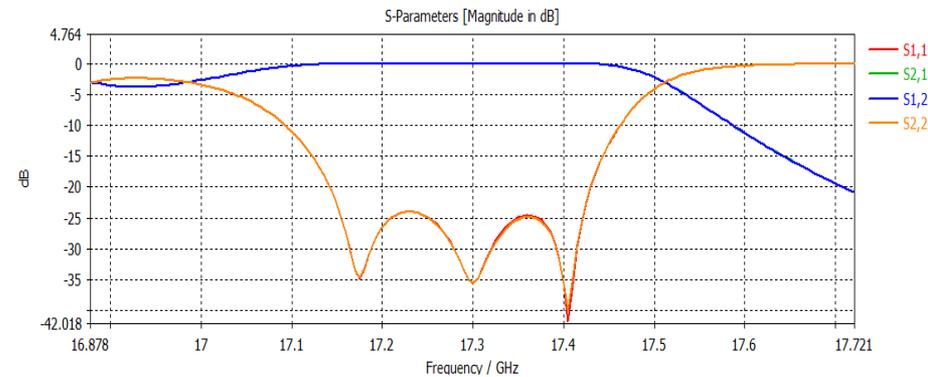
Diplexor con Filtros en diferente frecuencia

Pruebas y Resultados

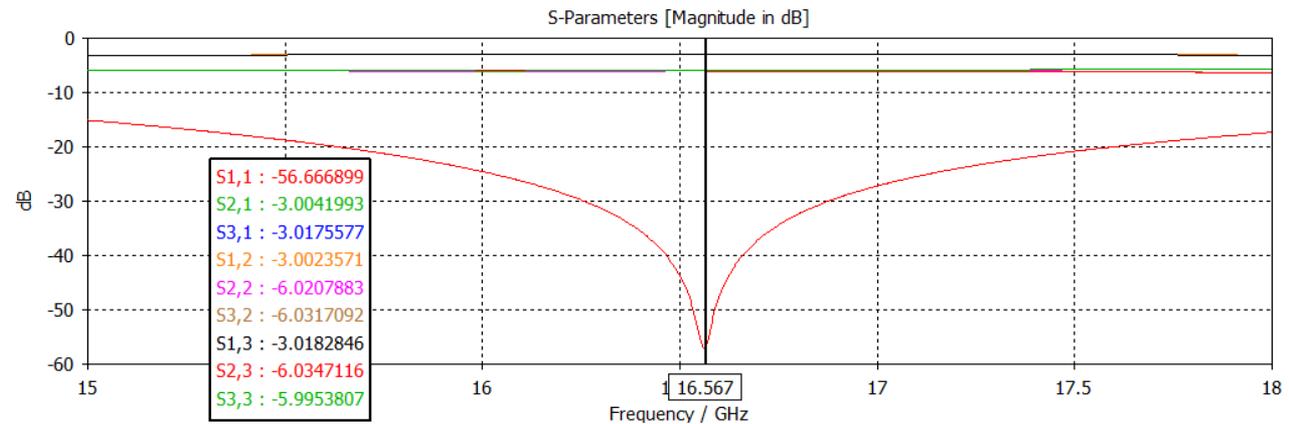
Filtro canal 1



Filtro canal 2

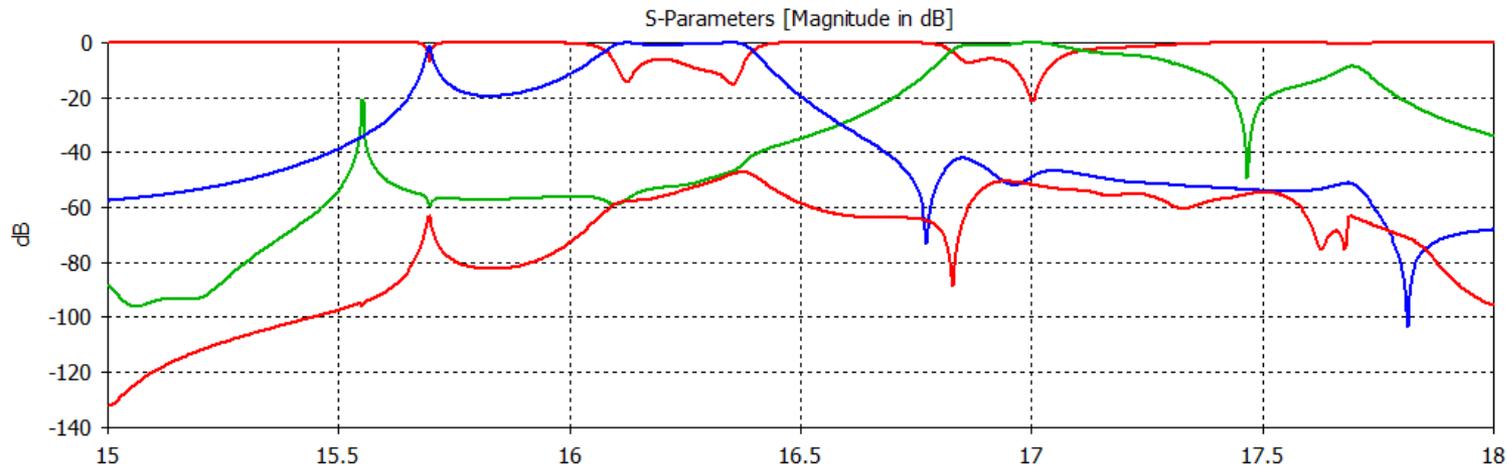


Divisor de potencia



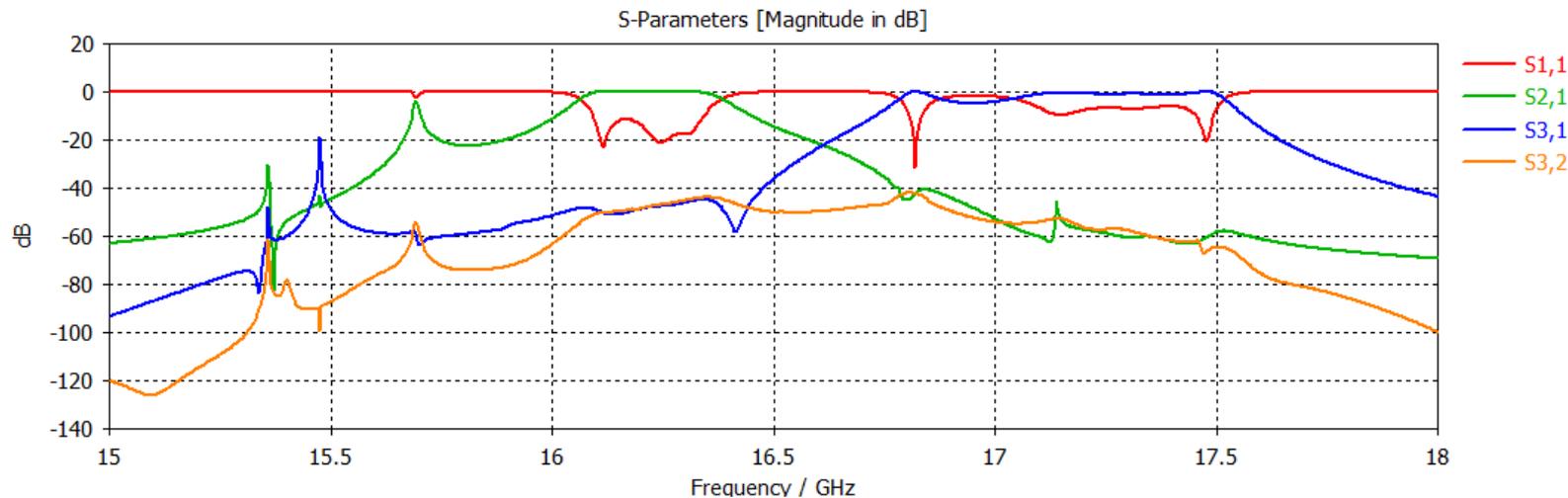
Diplexor con Filtros en diferente frecuencia

Pruebas y Resultados



Diplexor sin Optimizar

Diplexor Optimizado



- En este proyecto de investigación se ha realizado el diseño y simulación de filtros pasa banda, divisor de potencia y diplexor tanto en guía de onda rectangular como en SIW (Sustrato Integrado en Guía de Onda).

En la primera etapa de este trabajo se realizó el desarrollo de técnicas de diseño aproximadas mediante las cuales se calculan las dimensiones (largo de resonadores y apertura de los iris) de los filtros pasa banda una vez proporcionadas las frecuencias de corte, orden del filtro, ancho de los iris y las pérdidas de retorno. Cabe recalcar que como se trata de un modelo aproximado, las respuestas inicialmente no fueron las esperadas, por lo que se realizó la optimización en el software electromagnético para obtener un comportamiento más aproximado hacia la frecuencia central, este proceso de optimización modificó las dimensiones del filtro.
- La simulación de los filtros tuvo complicaciones al momento de encontrar las longitudes iniciales de los resonadores y las aperturas de los iris, ya que, para poder realizar la optimización, primero se debe escoger un rango de variación de parámetros que permita tener la respuesta esperada, lo que implicó procesos de simulación largos.



- De la misma forma que con los filtros pasa banda, se buscó el divisor de potencia que mejor se adaptara al ancho de banda apropiado y que diera la respuesta adecuada para su acoplo con los filtros. En este caso se simuló un divisor tipo T de tres puertos con dos iris inductivos. Posteriormente se unieron estos componentes para formar el diplexor en guía de onda que inicialmente estaba en una frecuencia de 17 GHz.
- Al momento de realizar la simulación del divisor de potencia, saber donde colocar los iris inductivos que mejoran la respuesta, fue inicialmente un procedimiento de larga ejecución. Porque inicialmente se variaban las dimensiones del segundo iris y resultó ser que el primero influía más en la respuesta del divisor. Este rango era muy sensible debido a que, si se modificaba en exceso estos límites, cambiaba totalmente los parámetros Scattering.
- Para la segunda etapa se realizó el paso de guía de onda a SIW, donde se utilizó el sustrato RF-35 en el diseño de cada parte del diplexor, filtros pasa banda y divisor de potencia.



- Se concluyó que, mediante la simulación de estructuras pequeñas para más altas frecuencias, el diplexor actúa de mejor manera y el ancho de banda es más grande. Además, que el tiempo de simulación en CST es considerablemente menor, debido a que a cuando se aumenta el tamaño de la estructura, entonces se torna un proceso de lenta ejecución en el software de simulación.
- Cuando se colocaron las transiciones en el diplexor SIW fue necesario realizar modificaciones necesarias para seguir obteniendo la respuesta apropiada en la simulación de CST, ya que al alargar el sustrato y aumentar componentes en la estructura, estas también afectaban a los parámetros Scattering.
- Un aspecto importante en este proyecto es el escalado de las estructuras, en un inicio el diplexor se desarrolló para frecuencia de 17 GHz que posteriormente mediante procesos de escala en la simulación se aumentó el tamaño y se redujo la frecuencia a 5 GHz. Sin embargo, estos procesos fueron de ejecución muy lenta por las dimensiones mayores a 80 cm.



- Se pretende construir físicamente el diplexor en SIW con el sustrato RF-35 y comprobar los resultados en el laboratorio de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- También se puede realizar el diseño y construcción del diplexor con filtros en diferentes frecuencias y que se identifiquen los canales por separado.
- Este proyecto se realizó a partir de filtros y divisor de potencia en guía de onda rectangular, más adelante se puede usar guía circular o ridge y observar el comportamiento de la estructura.
- Una propuesta de trabajo a futuro también sería buscar otro tipo de divisor de potencia porque en este proyecto se utilizó la tipo T con iris inductivos, además se puede cambiar la transición tipo Taper por otra que ofrezca mejor comportamiento al diplexor por un menor coste.





ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Diseñar y construir un diplexor que trabaje en la banda C con una frecuencia de 6 GHz para posteriormente realizar la escalabilidad del prototipo a la banda Ka para aplicaciones 5G

Autora: Gissela Alexandra Vega Trujillo

Director: Ing. Raúl Vinicio Haro Báez, MSc.

2022

