

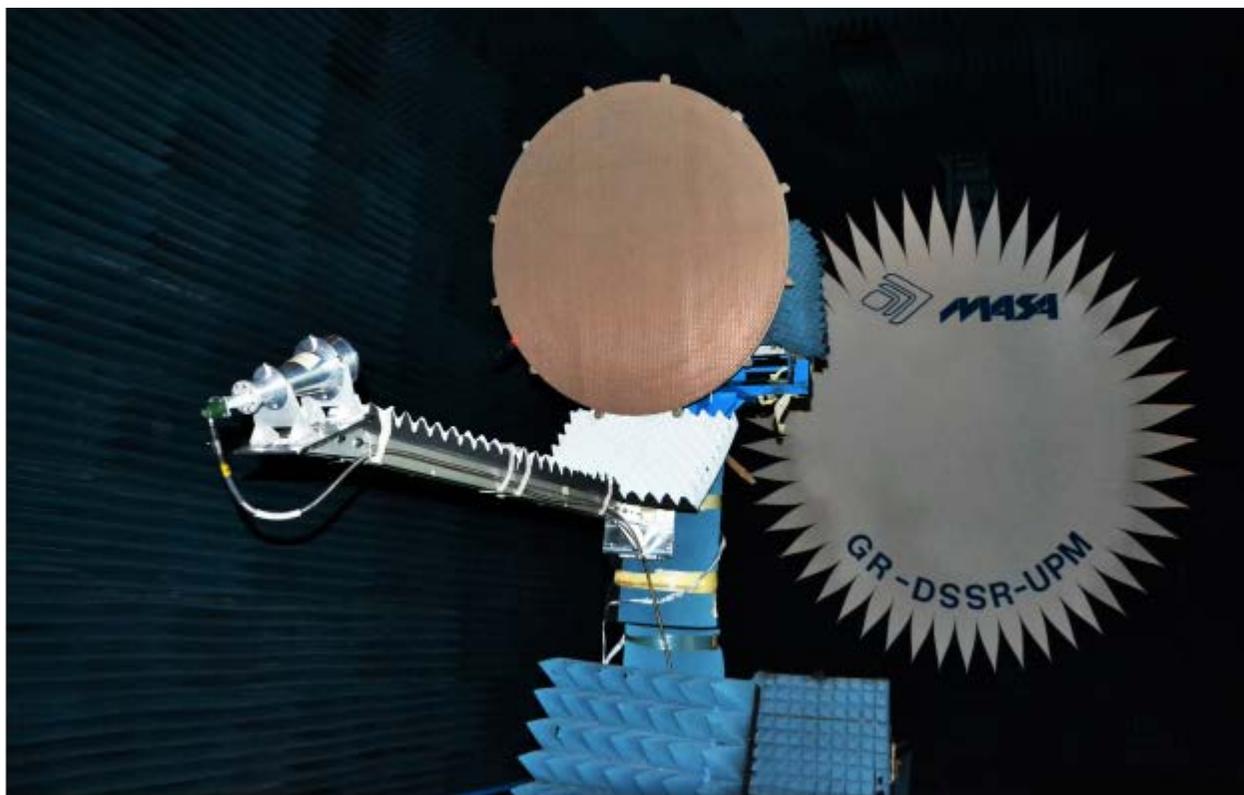
SOBRE EL DISEÑO DE UNA ANTENA MODERNA
(O POR QUÉ UN INGENIERO DEBE POSEER CIERTOS
CONOCIMIENTOS BÁSICOS)

JUAN E. PAGE
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

MÁLAGA 2017

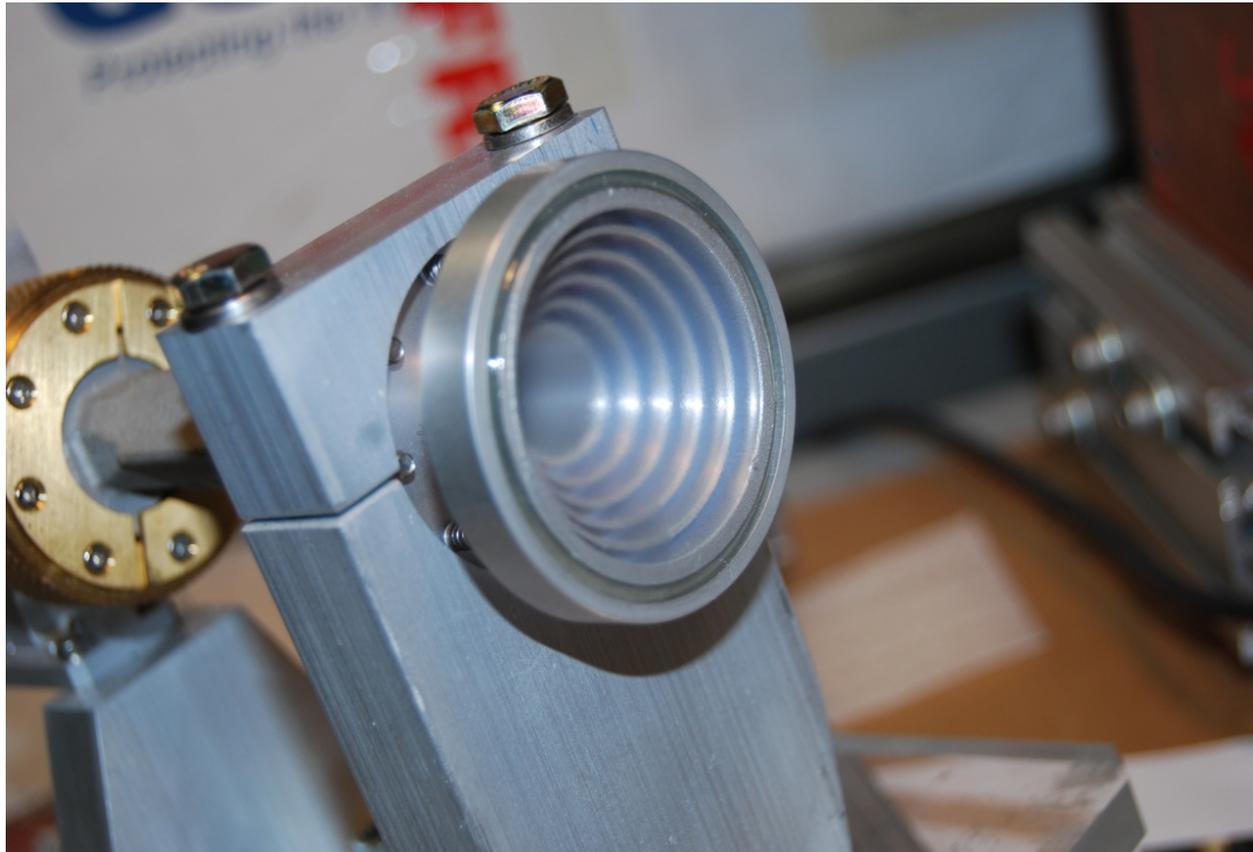
ANTENA MODERNA

AQUELLA POR CUYO DISEÑO LA AGENCIA ESPACIAL EUROPEA FIRMA UN CONTRATO DE GRAN VOLUMEN ECONÓMICO



ALIMENTADOR

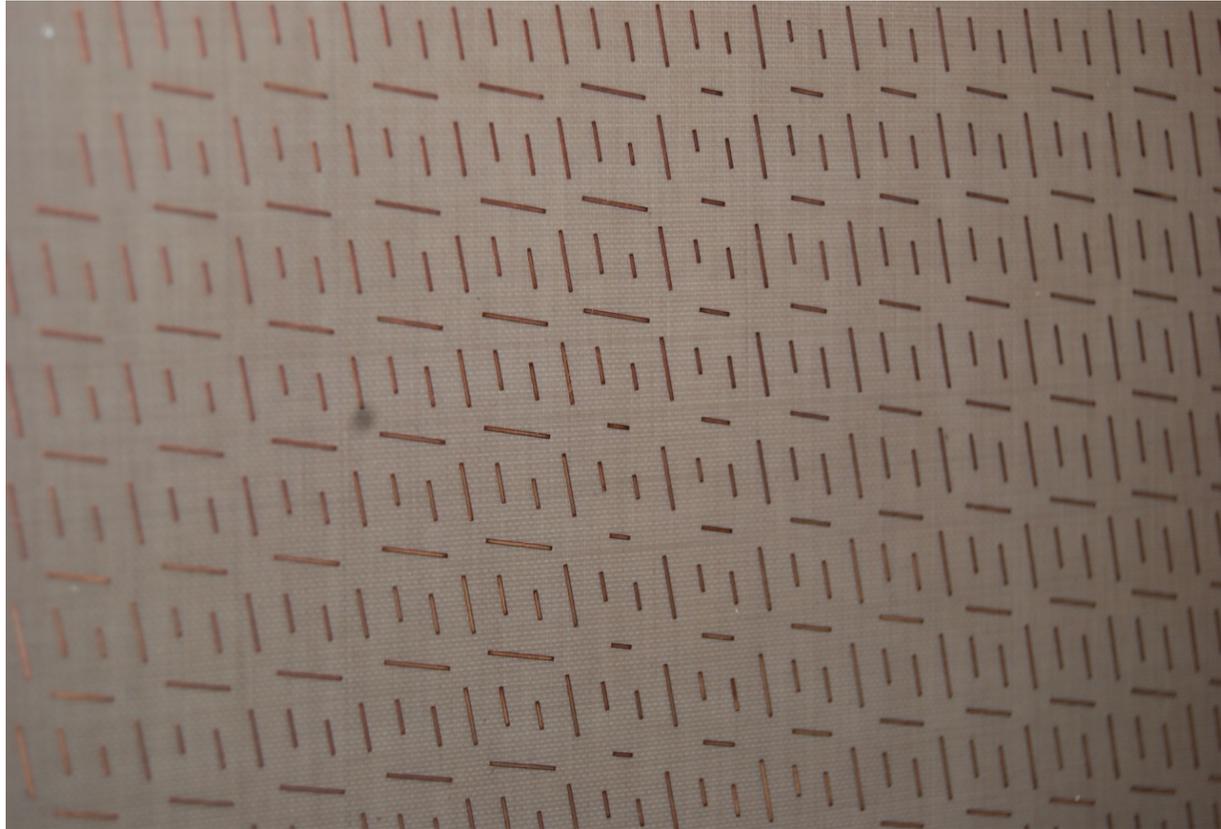
**UNA ANTENA DE BOCINA CLÁSICA
(MÁS O MENOS COMPLICADA)**



DISPOSITIVO BASTANTE ESTUDIADO

PRODUCE UN
CAMPO ELECTROMAGNÉTICO
QUE
A GRAN DISTANCIA
ES UNA
ONDA PLANA
CON UNA
DIRECCIÓN DE PROPAGACIÓN
Y UNA
POLARIZACIÓN

REFLECTOR



**UNA, O MÁS, CAPAS DE OBSTÁCULOS CONDUCTORES
(DIFRACTORES) DISTRIBUÍDOS DE MANERA
CONVENIENTE Y CON FORMAS VARIADAS**

**EL REFLECTOR MODIFICA EL CAMPO INCIDENTE
EN TRANSMISIÓN Y REFLEXIÓN
Y LO TRANSFORMA EN EL DESEADO PARA QUE
EL DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE LA ANTENA
TENGA
LAS CARACTERÍSTICAS ADECUADAS A LA
APLICACIÓN**

¡LA POLARIZACIÓN CAMBIA!

**EL ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UNA DE
ESTAS ESTRUCTURAS ES UN PROBLEMA NUMÉRICO
FORMIDABLE, HASTA DISPONIENDO DE UN
SOFTWARE ADECUADO Y DE UNA MÁQUINA POTENTE
Y EFICIENTE**

**LA SÍNTESIS
INCLUSO UNA OPTIMIZACIÓN CON UNA BUENA "SEMILLA"
¡ES PRÁCTICAMENTE IMPOSIBLE!**

DISEÑO APROXIMADO

**LOS ELEMENTOS CONDUCTORES DE UNA CIERTA
REGIÓN SON IGUALES Y ESTÁN DISTRIBUIDOS
PERIÓDICAMENTE
(PERIODICIDAD LOCAL)**

SE ADMITE QUE OCUPAN UN PLANO INDEFINIDO

SUPERFICIE SELECTIVA EN FRECUENCIA (FSS)

**CADA REGIÓN DEL REFLECTOR SE TRATA
COMO UNA FSS DISTINTA**

PROBLEMA REDUCIDO

¡INCIDENCIA OBLICUA! DE UNA ONDA PLANA SOBRE UNA FSS

**MUCHOS SIMULADORES ELECTROMAGNÉTICOS
INCORPORAN ESTE TIPO DE PROBLEMAS EN SUS
LIBRERÍAS**

**SON DIFÍCILES PORQUE INCLUYEN VARIOS
DIELÉCTRICOS Y CONDICIONES DE CONTORNO
PERIÓDICAS Y DEPENDIENTES DE LA DIRECCIÓN DE
INCIDENCIA DE LA ONDA**

PROBLEMA MÁS REDUCIDO

DIELÉCTRICO AIRE

DIFRACTORES DE CONDUCTOR PERFECTO

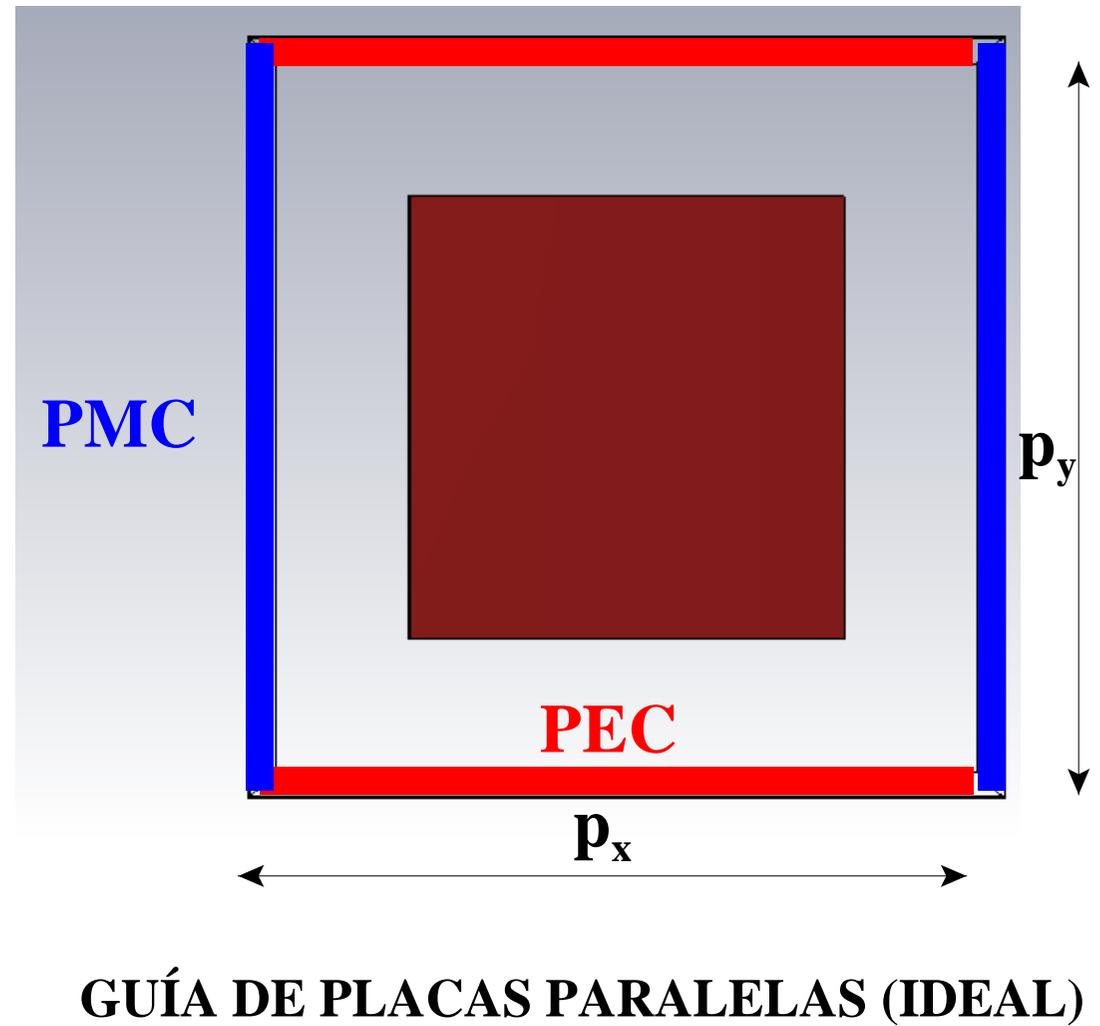
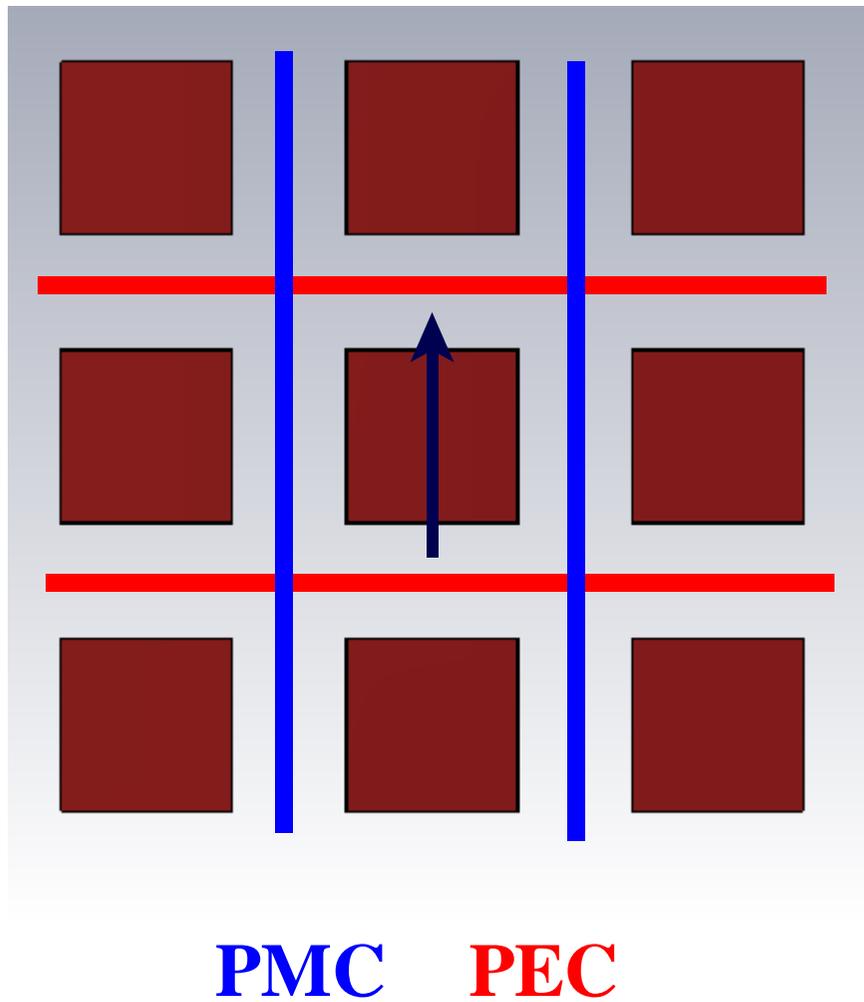
¡CON DOBLE SIMETRÍA RESPECTO A LOS LADOS DEL PERIODO!

INCIDENCIA NORMAL

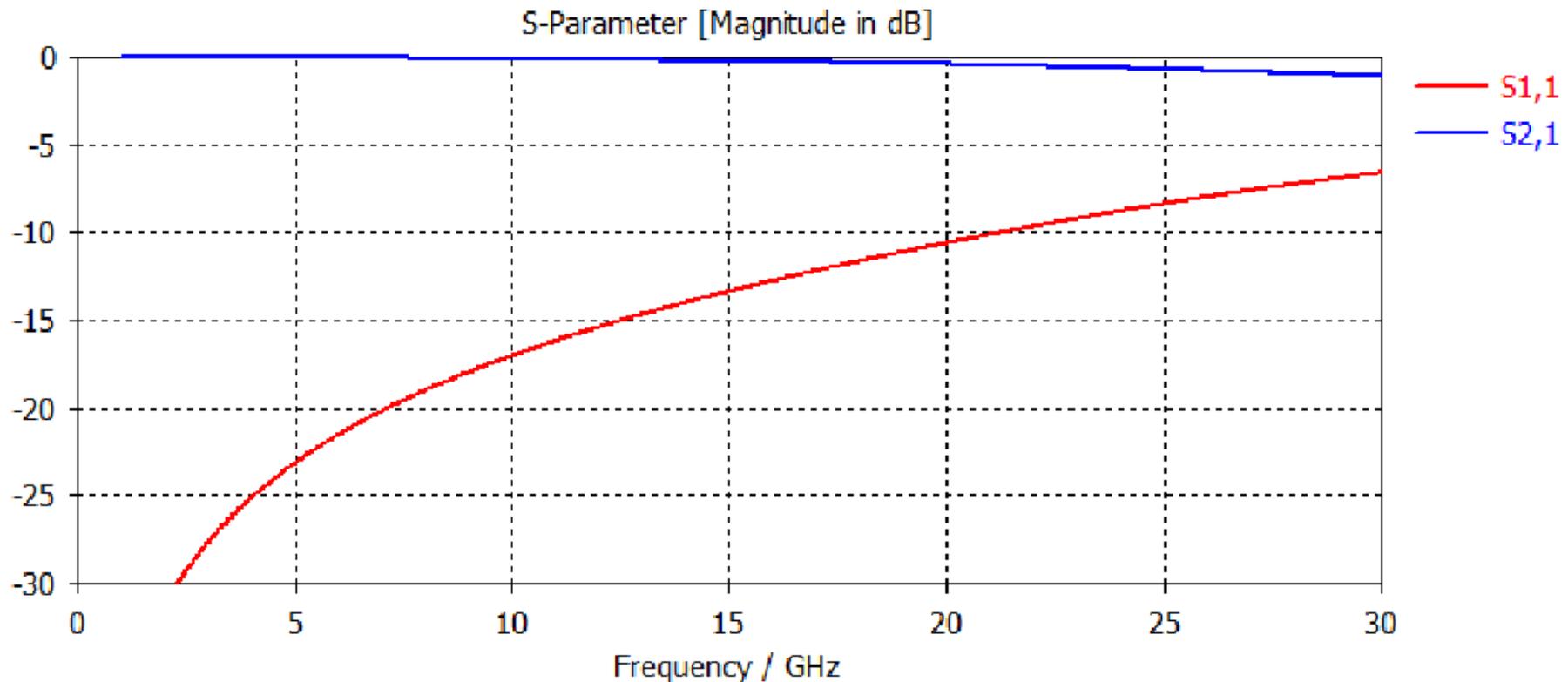
POLARIZACIÓN LINEAL PARALELA A UNO DE LOS LADOS DEL PERIODO

**LAS DOS POLARIZACIONES LINEALES PARALELAS A
LOS LADOS DEL PERIODO SON ORTOGONALES
(UNA NO GENERA LA OTRA)**

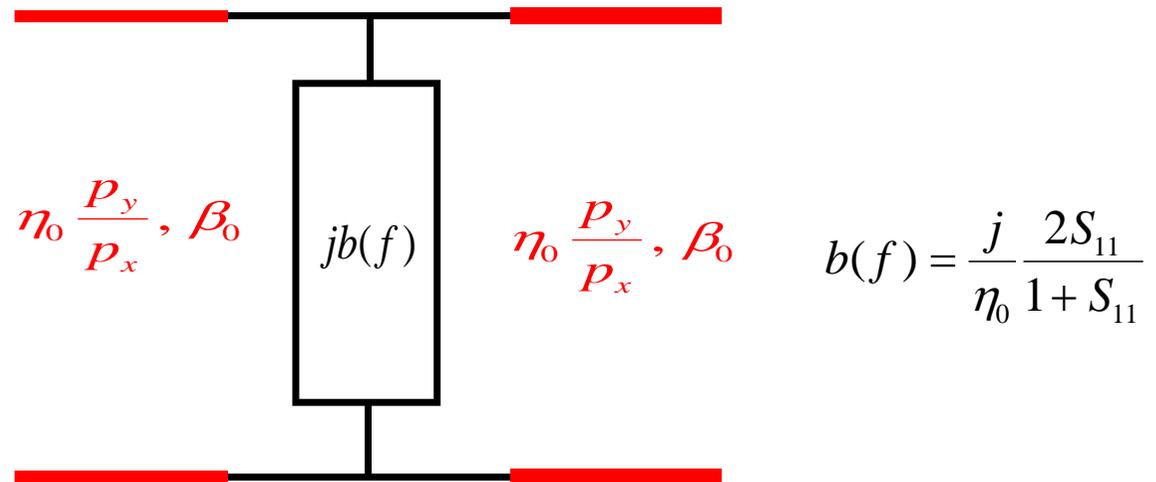
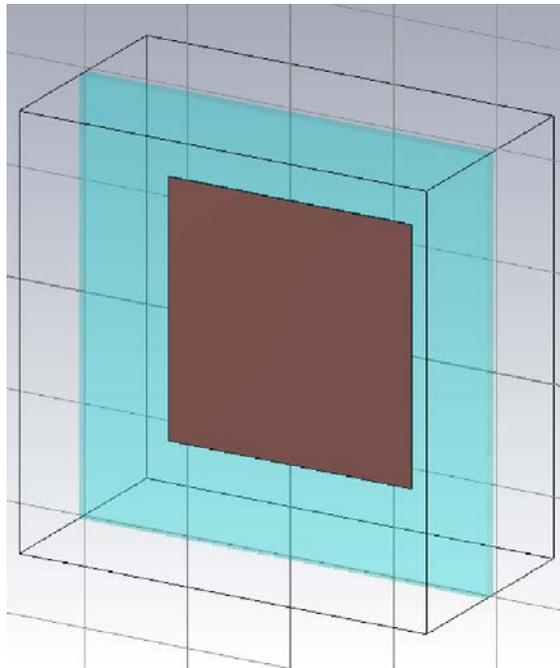
CONDICIONES DE CONTORNO Y SISTEMA DE TRANSMISIÓN EQUIVALENTE



**DISCONTINUIDAD TRANSVERSAL
EN UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN
PROBLEMA “MUY SENCILLO”
CON UN SOLO MODO PROPAGÁNDOSE
(“MODE MATCHING” CLÁSICO)**



EN LA BANDA DE PROPAGACIÓN DEL MODO FUNDAMENTAL
0 - 300/p_x(mm) GHz
ADMITE CIRCUITO EQUIVALENTE



K. Kurokawa “An Introduction to the Theory of Microwave Circuits” pp. 149-150

RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO

**MEJOR NO USAR UN PERIODO DEMASIADO GRANDE
PARA QUE NO SE PROPAGUE NINGÚN MODO
SUPERIOR**

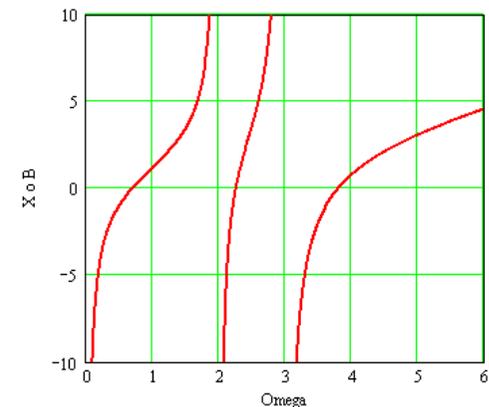
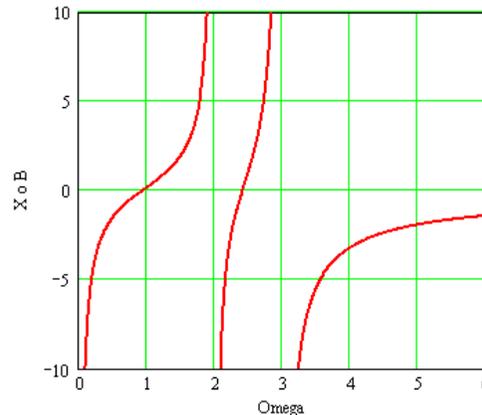
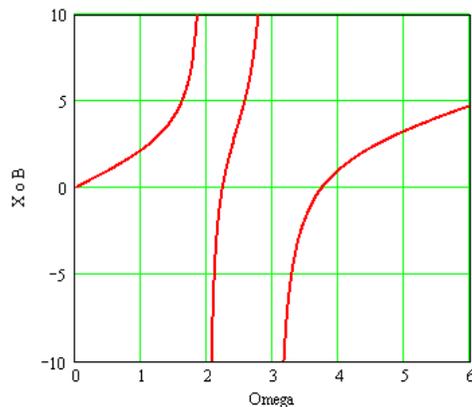
**SI HAY OTRA CAPA
MEJOR QUE NO ESTÉ MUY CERCA PARA EVITAR
INTERACCIONES POR MODOS EVANESCENTES**

¿COMO VARÍA b CON ω ? (TEOREMA DE FOSTER)

W. Warzanskij "Métodos de síntesis de redes lineales" pp. 64-66

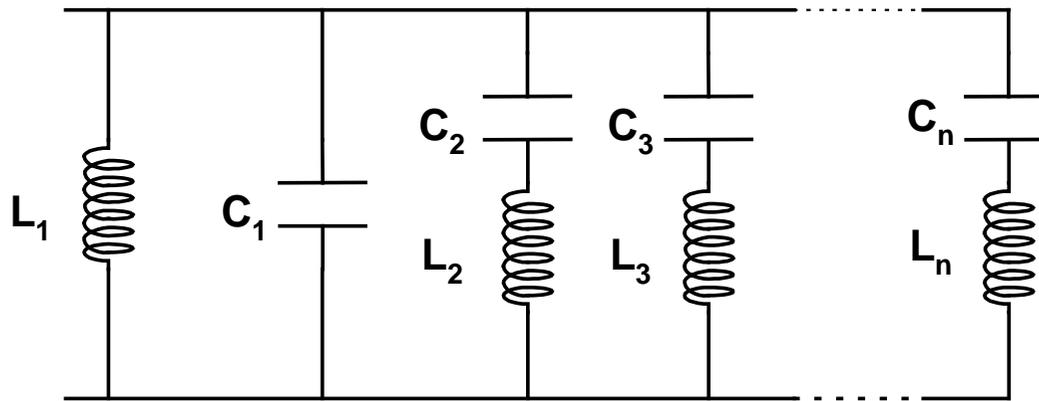
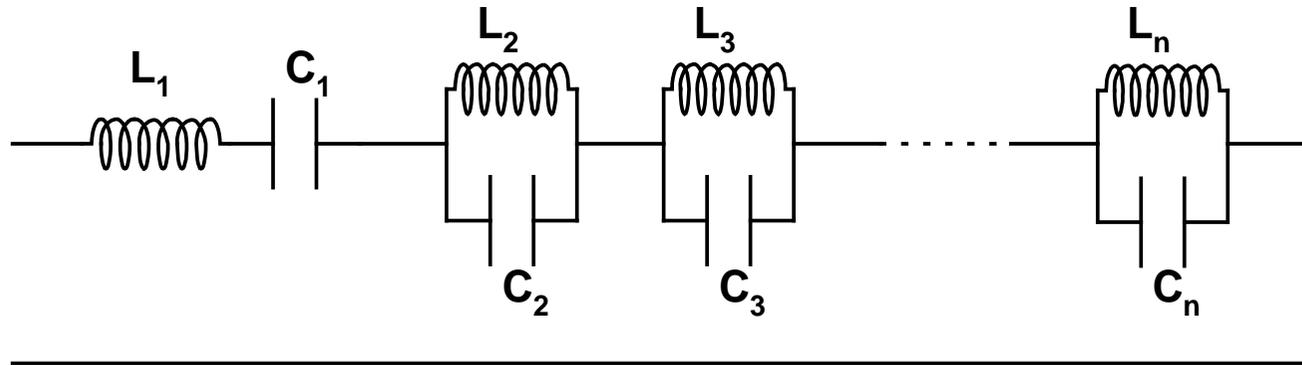
**TANTO b COMO SU INVERSA VARIAN CON LA PULSACIÓN
DE LA FORMA**

$$F(s) = \frac{k_0}{s} + \frac{2k_1s}{s^2 + \omega_1^2} + \frac{2k_2s}{s^2 + \omega_2^2} + \dots + k_\infty s \quad s = j\omega$$



**EN LA BANDA MONOMODO HAY UN NÚMERO
DETERMINADO DE POLOS Y CEROS**

¿SE PUEDE VISUALIZAR EL "INTERIOR" DE b?



UNA DE ESTAS TOPOLOGÍAS REPRESENTA b PUDIENDO FALTAR L_1 O C_1

PARA LA BANDA MONOMODO SE REQUIERE UN NÚMERO DETERMINADO DE RESONADORES

LA GEOMETRÍA DEL DIFRACTOR NO CAMBIA LA TOPOLOGÍA DEL CIRCUITO EQUIVALENTE SINO SOLO LA FORMA DE VARIACIÓN DE b CON LA FRECUENCIA

DICHA FORMA ESTÁ TOTALMENTE DETERMINADA POR LAS FRECUENCIAS DE RESONANCIA DE LOS

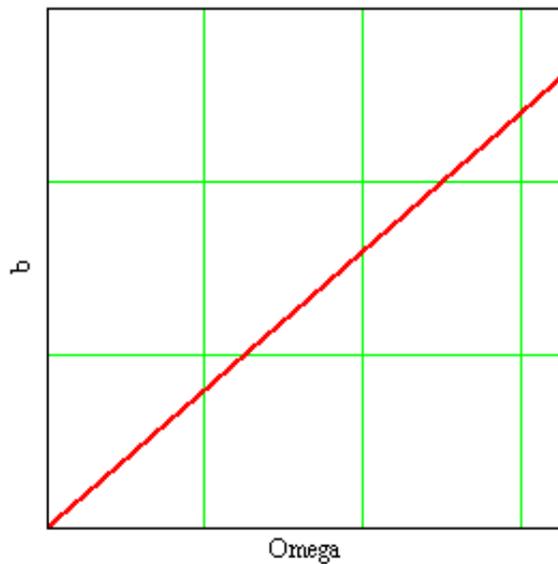
RESONADORES Y POR SU IMPEDANCIA PROPIA $\sqrt{\frac{L}{C}}$

ELEGIR UN DIFRACTOR U OTRO MODIFICA:

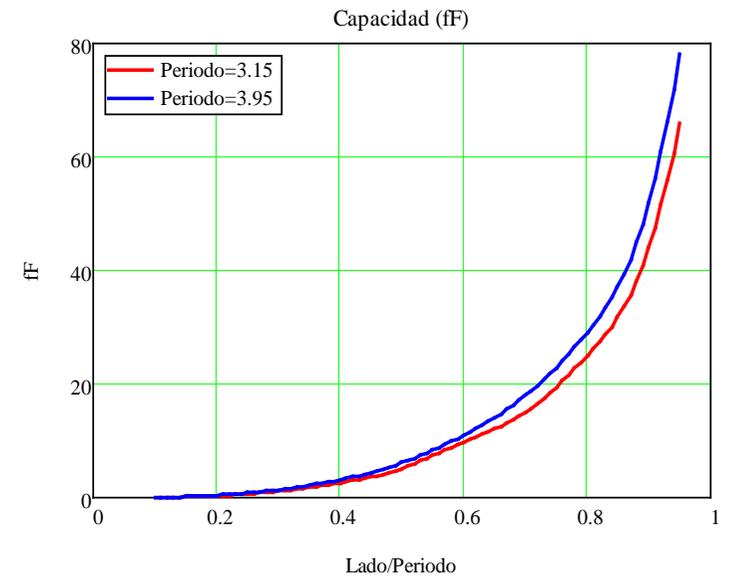
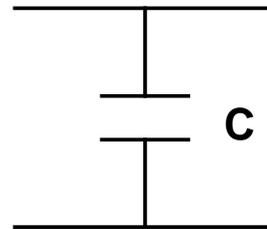
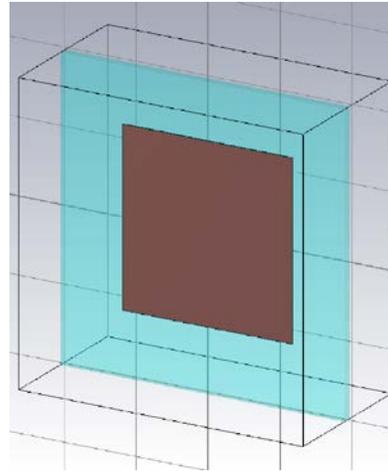
- EL NÚMERO DE RESONADORES NECESARIOS PARA DESCRIBIR SU COMPORTAMIENTO EN LA BANDA MONOMODO**
- LAS IMPEDANCIAS PROPIAS DE CADA UNO DE ELLOS**

VEAMOS UN EJEMPLO CONCRETO

EL PARCHE CUADRADO



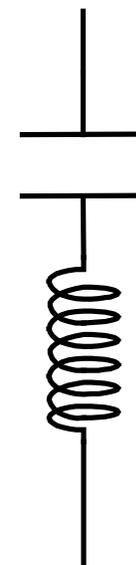
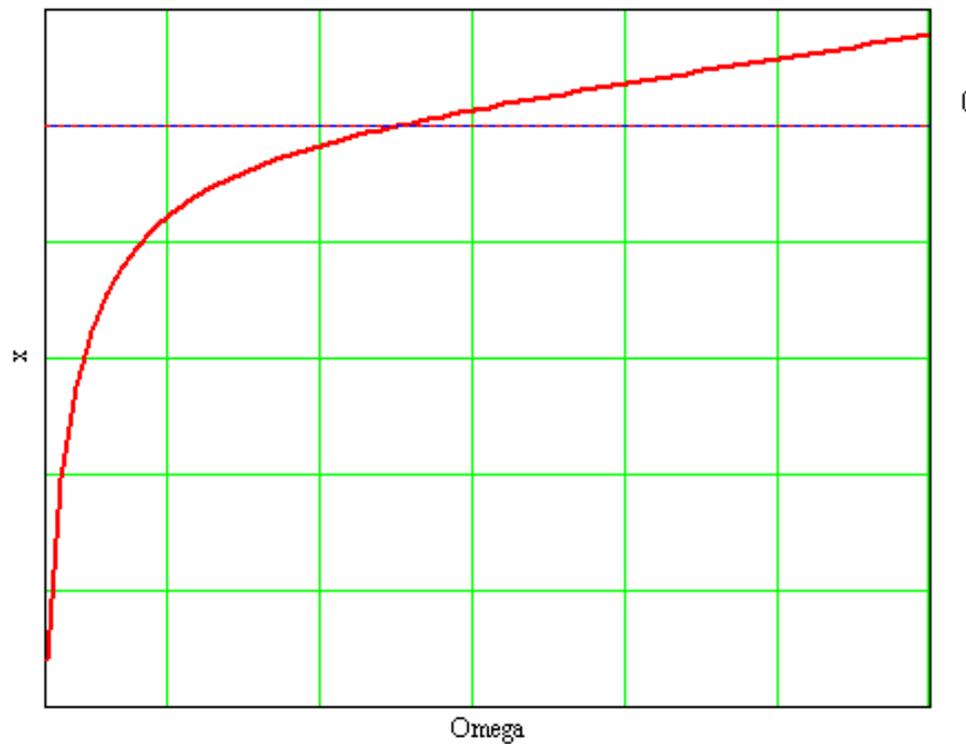
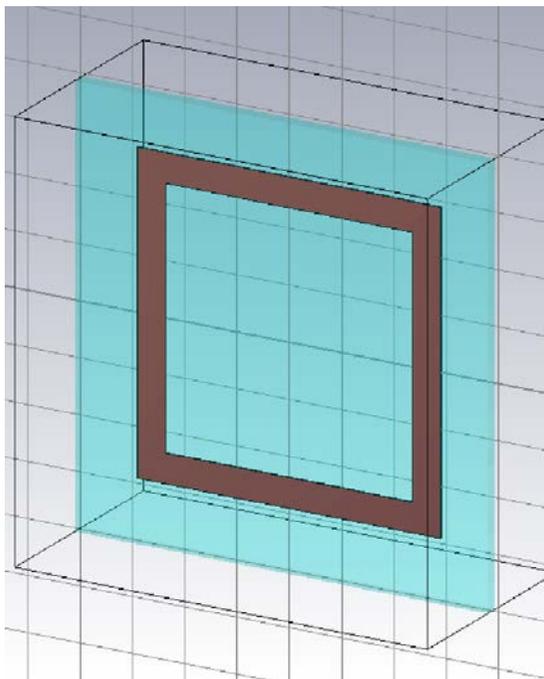
SUSCEPTANCIA



**CLARAMENTE UN CONDENSADOR QUE PUEDE
CALCULARSE EN FUNCIÓN DEL LADO**

OTRO EJEMPLO

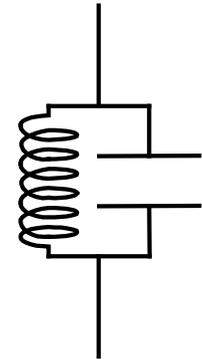
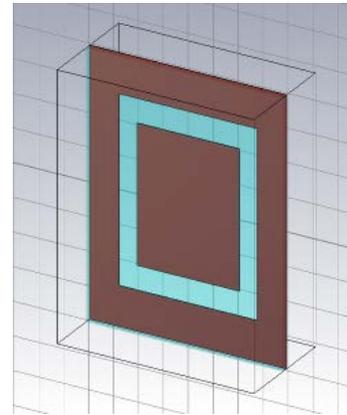
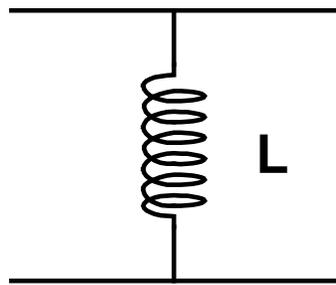
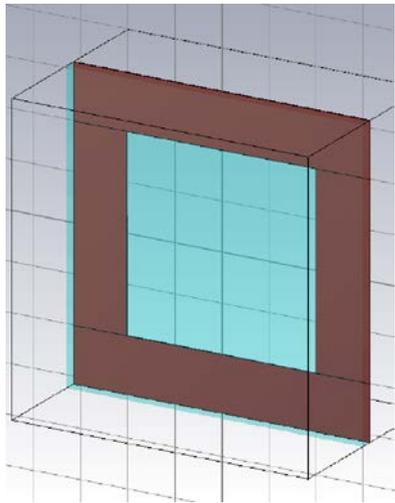
EL ANILLO CUADRADO



UN RESONANTE SERIE

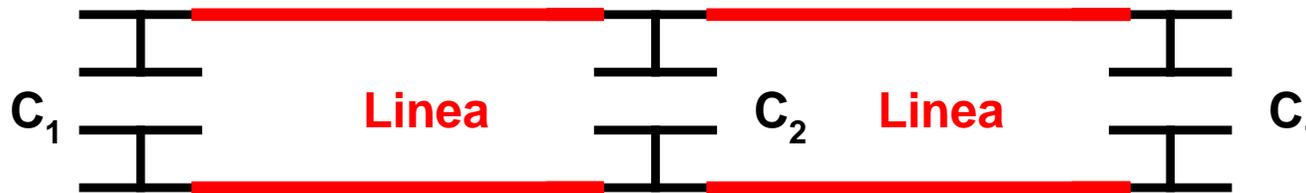
Y POR DUALIDAD (BABINET)

LA APERTURA CUADRADA SERÁ UNA INDUCTANCIA Y
LA RANURA UN RESONANTE PARALELO

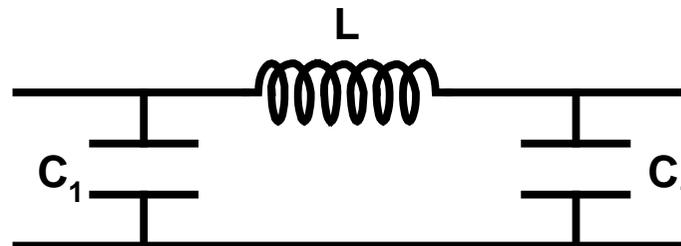


YA TENEMOS LOS ELEMENTOS BÁSICOS PARA
DISEÑAR UNA FSS APROVECHÁNDONOS DEL
CIRCUITO EQUIVALENTE DEL DIFRACTOR
POR EJEMPLO UNA **FSS** QUE FUNCIONE CON
COMPORTAMIENTO **PASO-BAJO**

- CADA CAPA SUMNINISTRA UN ELEMENTO
 - USANDO PARCHES CUADRADOS LOS ELEMENTOS SON CONDENSADORES EN PARALELO
 - PODEMOS SUPERPONER CAPAS SEPARADAS POR UNA DISTANCIA, PERO...
- ¡OBTENEMOS UNA TOPOLOGÍA TODO-PARALELO!

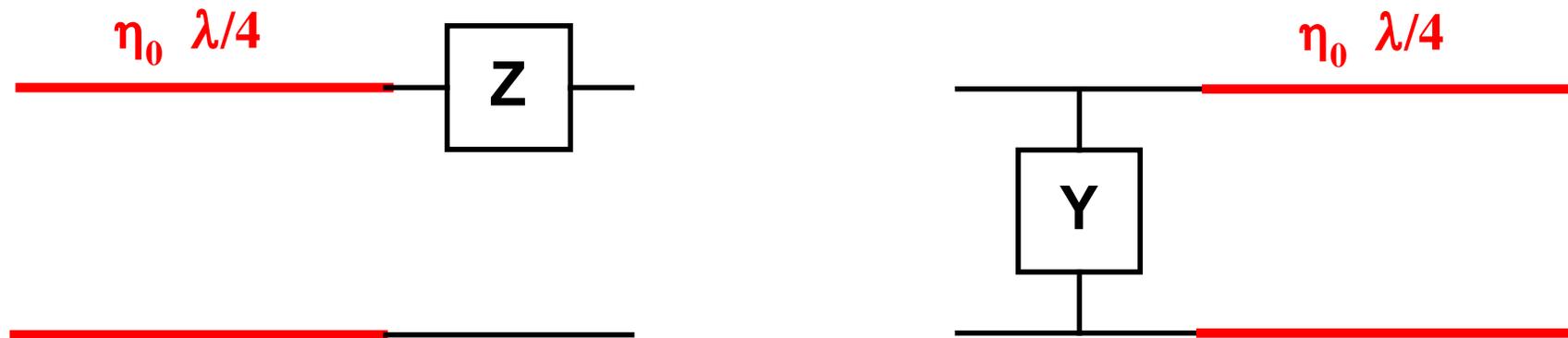


CUANDO UN FILTRO PASO-BAJO ES



**LOS ELEMENTOS SERIE EN UNA TOPOLOGÍA SE
PUEDEN TRANSFORMAR EN ELEMENTOS PARALELO
DE VARIAS MANERA PERO LA MÁS CONVENIENTE EN
NUESTRO CASO ES**

EL INVERSOR EN $\lambda/4$



$$\frac{Z}{Y} = \eta_0^2$$

ATENCIÓN

¡LA RESPUESTA EN FRECUENCIA NO ES LA MISMA!

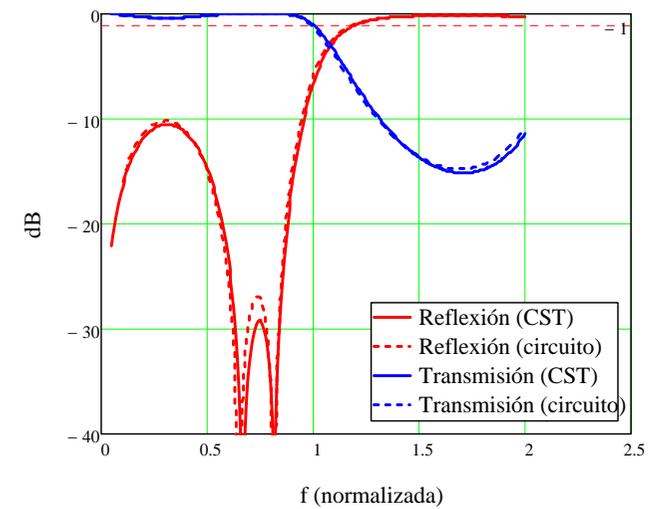
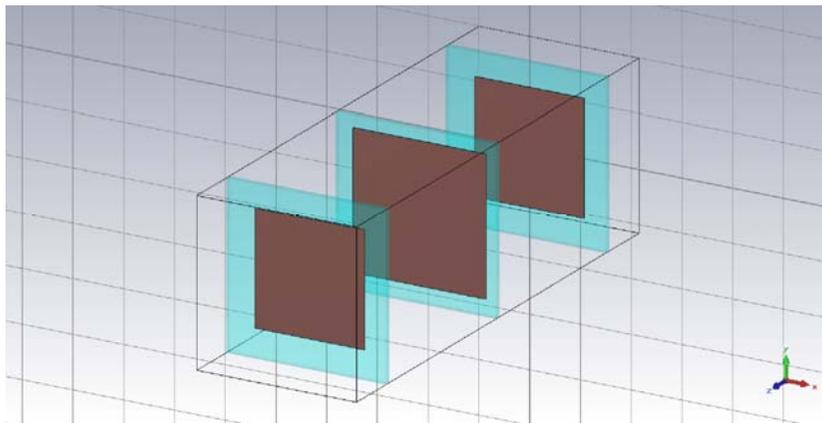
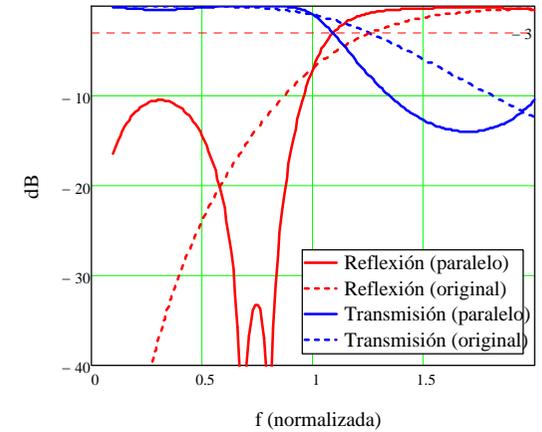
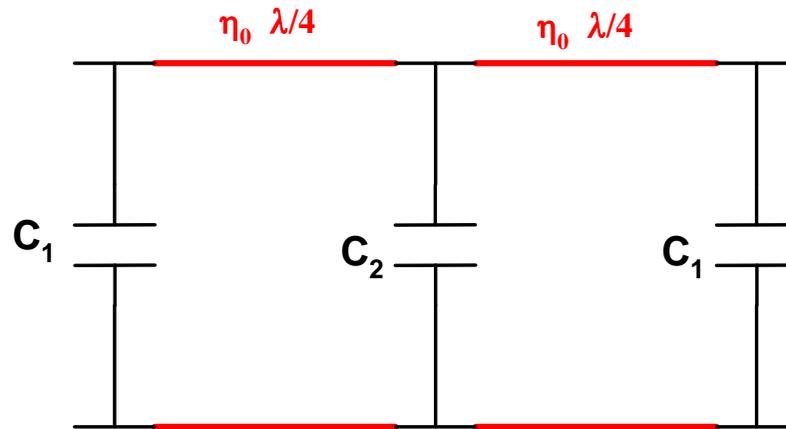
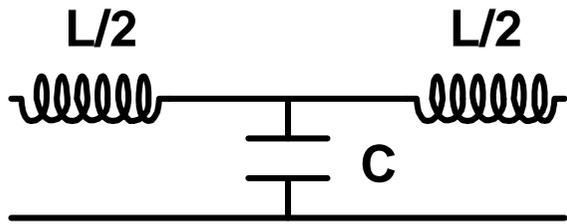
**AHORA SÍ QUE PODEMOS DISEÑAR UNA FSS CON
RESPUESTA PASO-BAJO CON AYUDA DE LA TEORÍA DE
DISEÑO DE FILTROS DE MICROONDAS**

**ELEGIMOS LA BANDA Y EL TIPO DE RESPUESTA
Y OBTENEMOS EL NÚMERO DE ELEMENTOS
(CAPAS DE DIFRACTORES) Y EL VALOR DE LOS
CONDENSADORES (LADO DEL PARCHE CUADRADO)**

D.M.Pozar "Microwave Engineering" Cap. 8

**LAS SEPARACIONES ENTRE CAPAS VALEN EN ESTOS
DISEÑOS $\lambda/4$**

PODEMOS DISEÑAR UN PASO BAJO DE k CONSTANTE

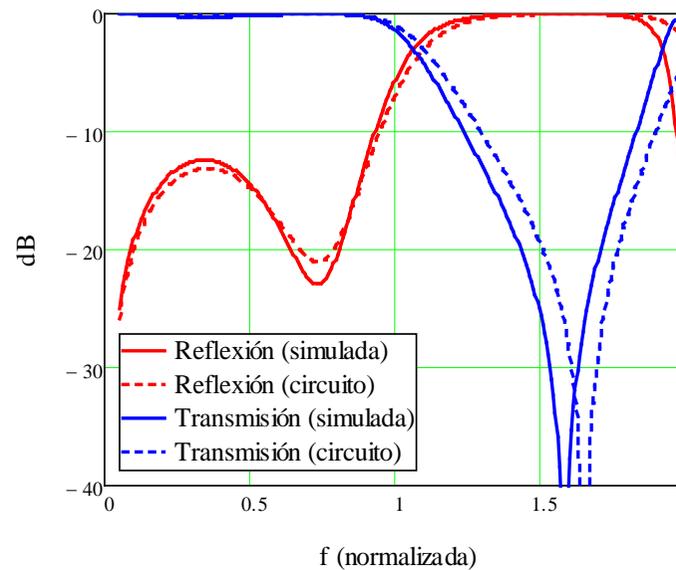
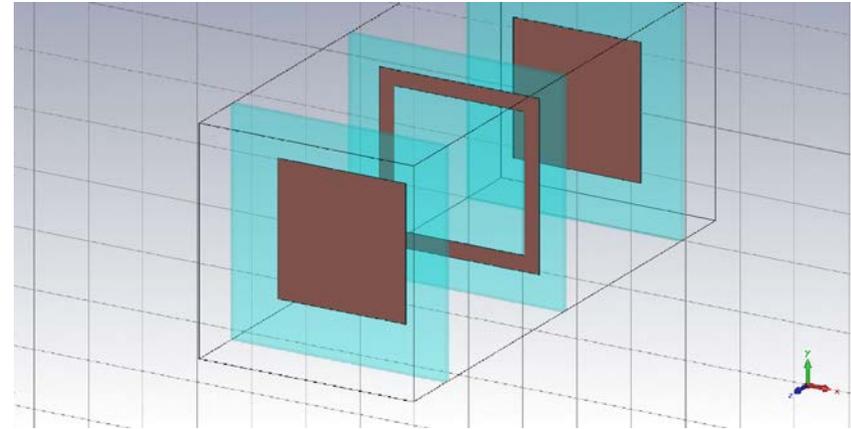
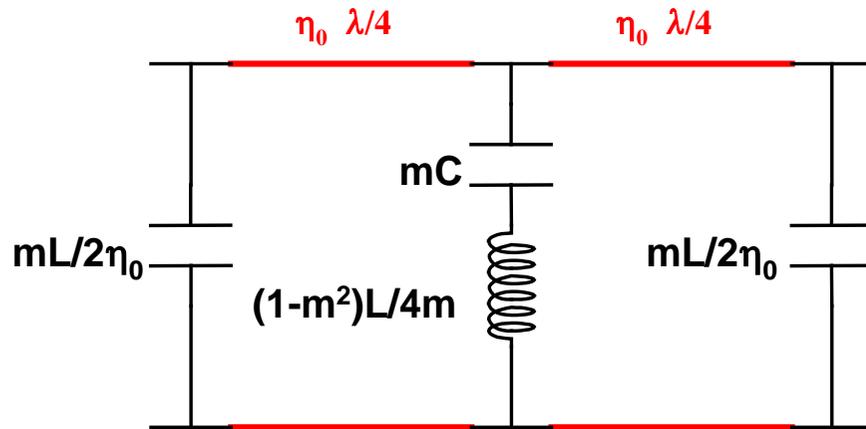


O INTRODUCIR UN **POLO DE TRANSMISIÓN** (m-DERIVADO)

¡NECESITAREMOS UN ANILLO!

1dB a 20GHz

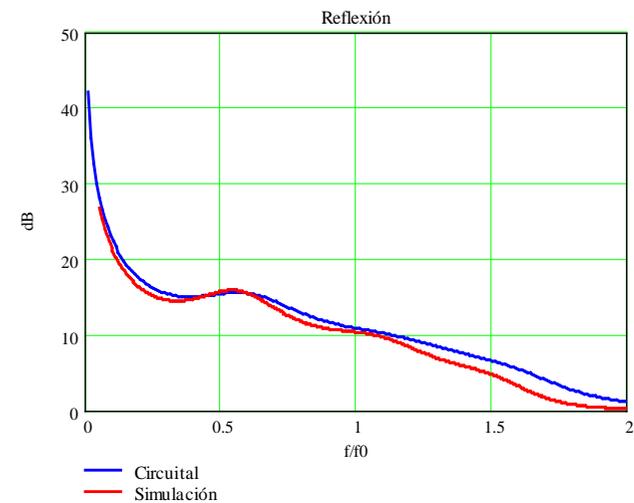
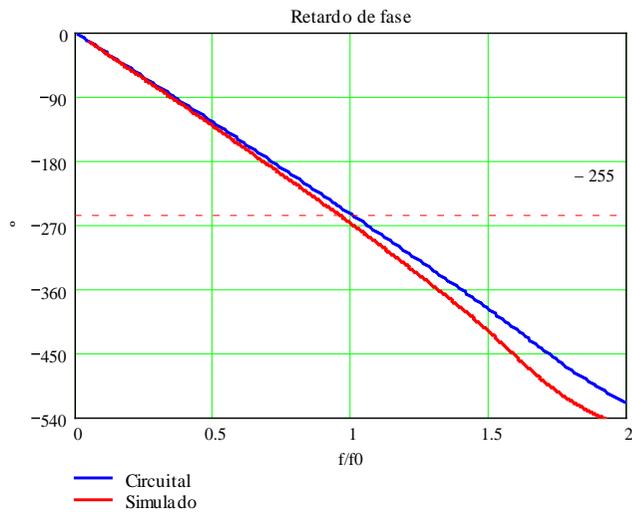
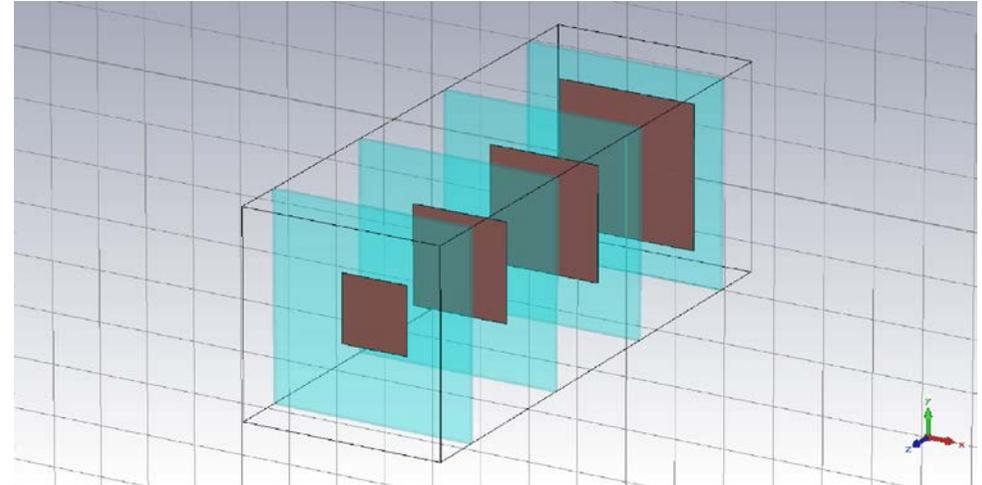
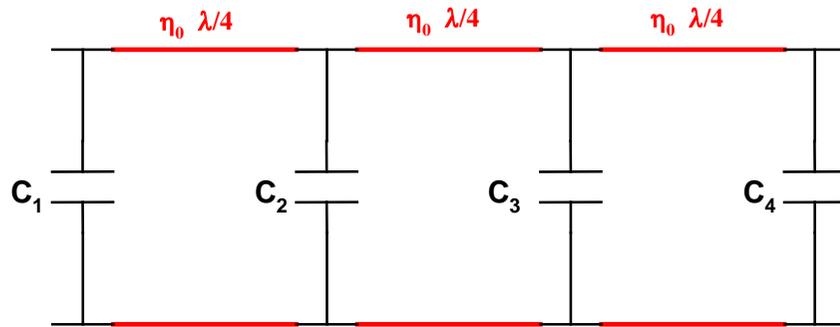
Polo en 33GHz



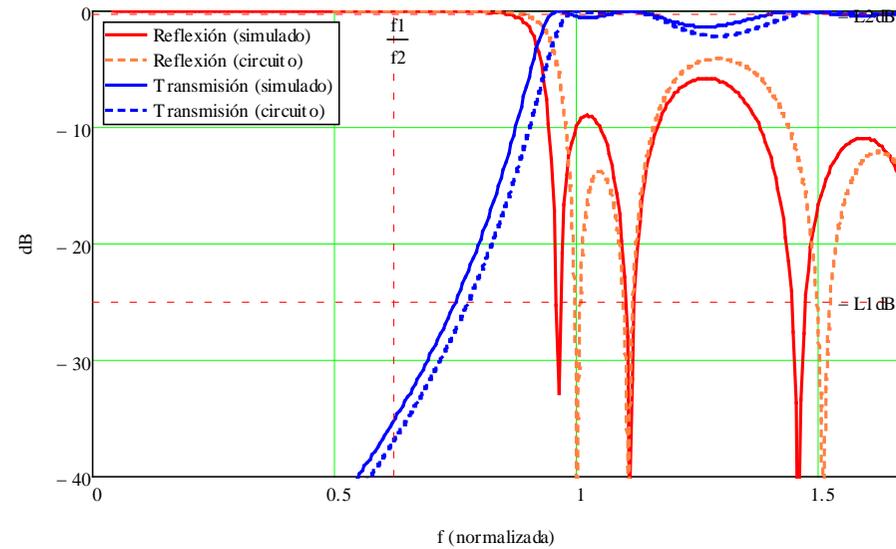
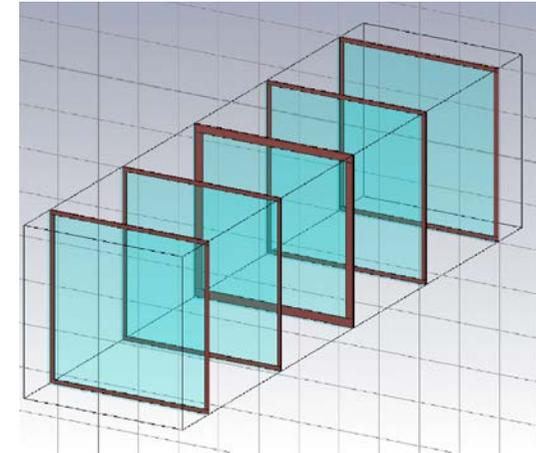
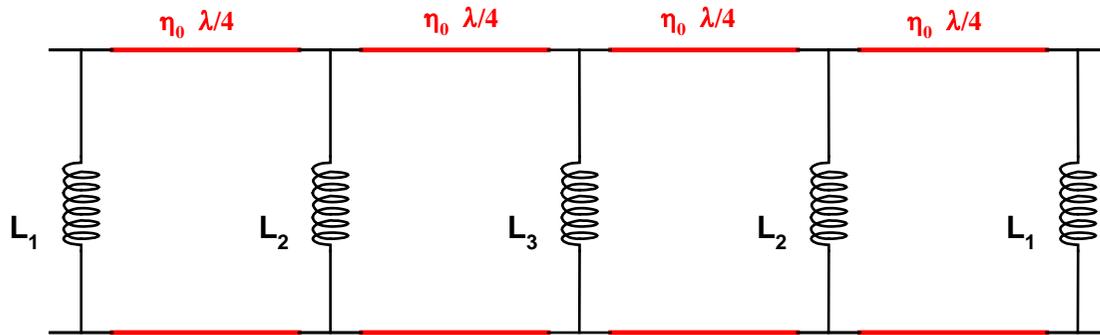
O UN PASO-BAJO DE **FASE LINEAL**

(BESSEL-Warzenskij Cap. XVI)

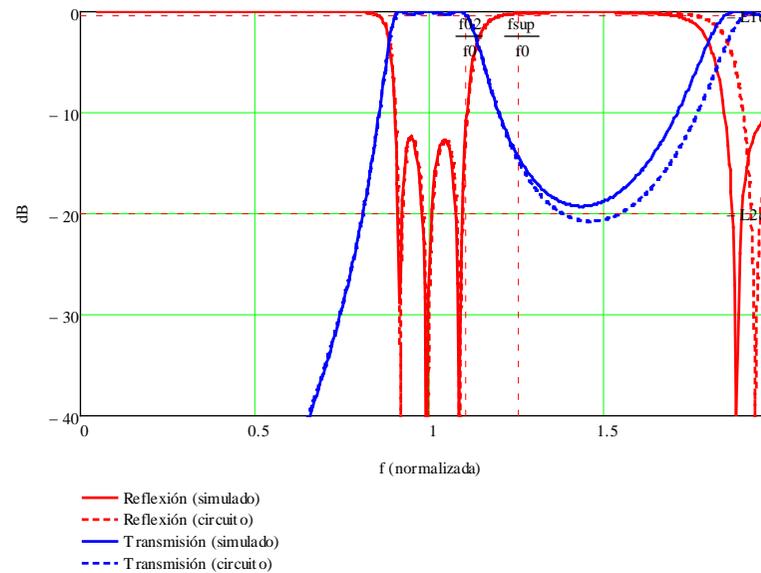
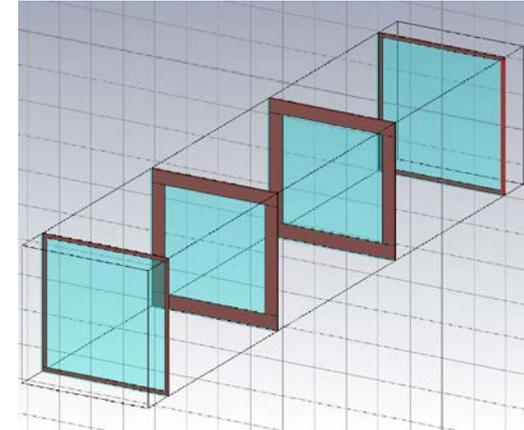
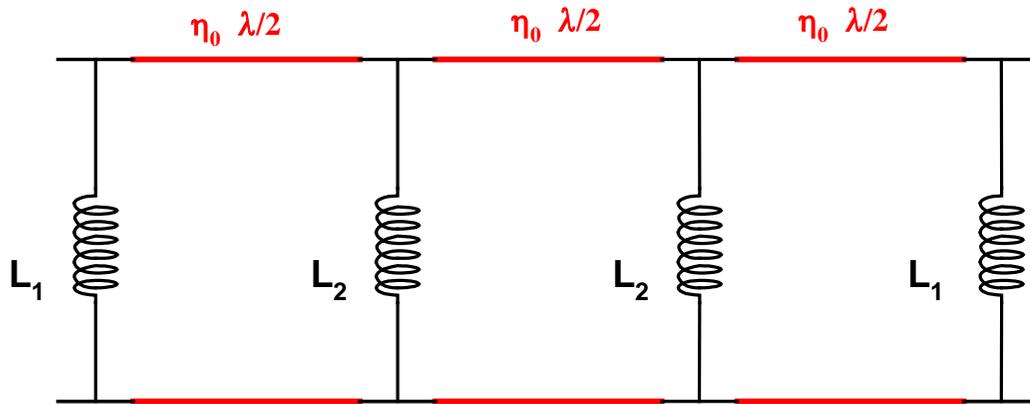
45° a 20 GHz **ORDEN 4**



O UN PASO-ALTO CON RESPUESTA EQUI-RIZADO USANDO APERTURAS



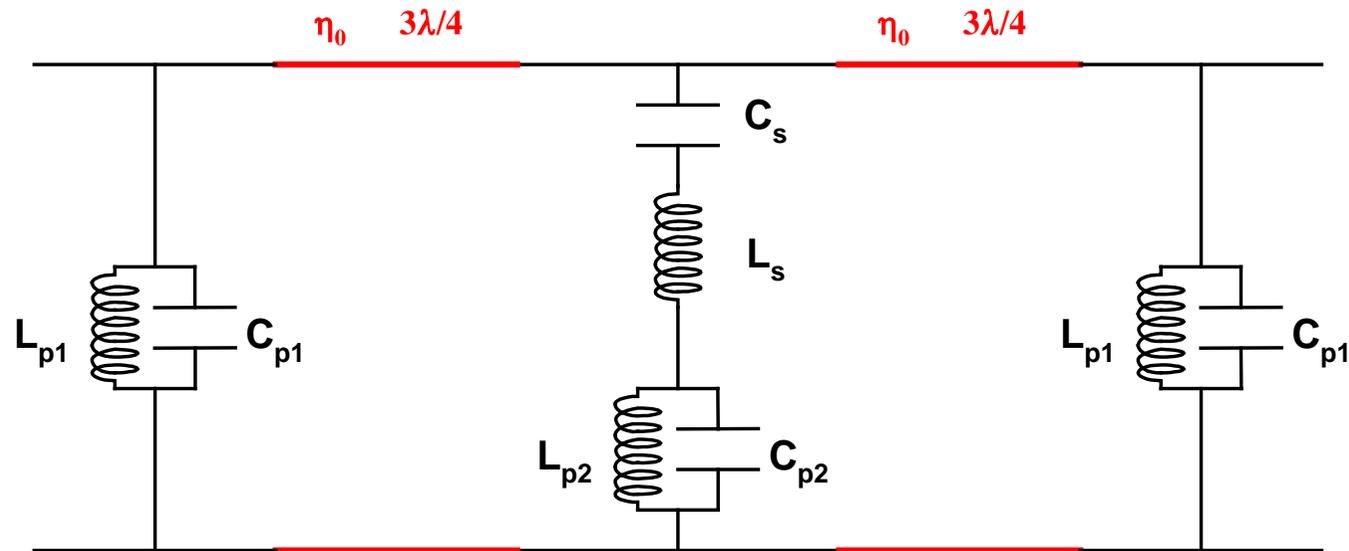
O UN PASO BANDA DE RESONADORES EN $\lambda/2$ ACOPLADOS POR INDUCTANCIA



COMO PARECE QUE FUNCIONA MUY BIEN, PODEMOS
ARRIESGARNOS CON DISEÑOS MAS COMPLICADOS
POR EJEMPLO

UN FILTRO ELÍPTICO (DOBLE EQUI-RIZADO)

A.I. Zverev "Handbook of Filter Synthesis" Cap. 5
TENDRÍA, PARA ORDEN TRES, LA TOPOLOGÍA

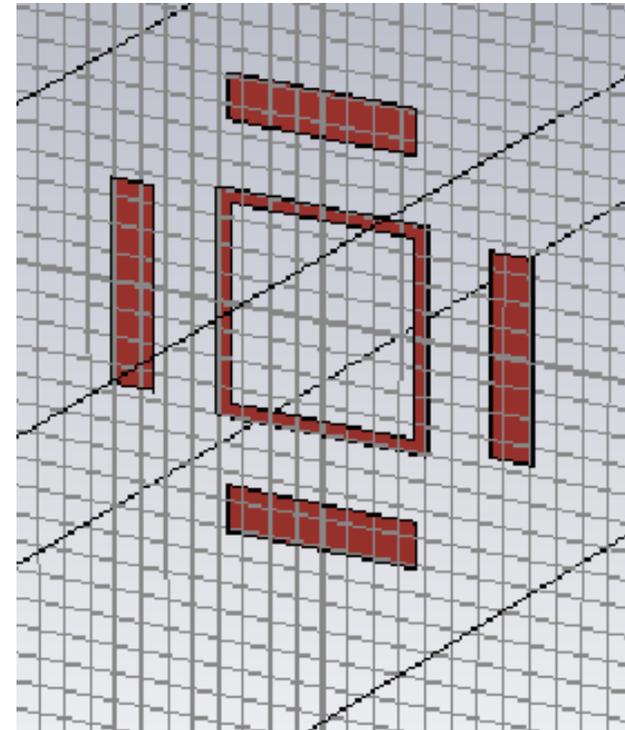
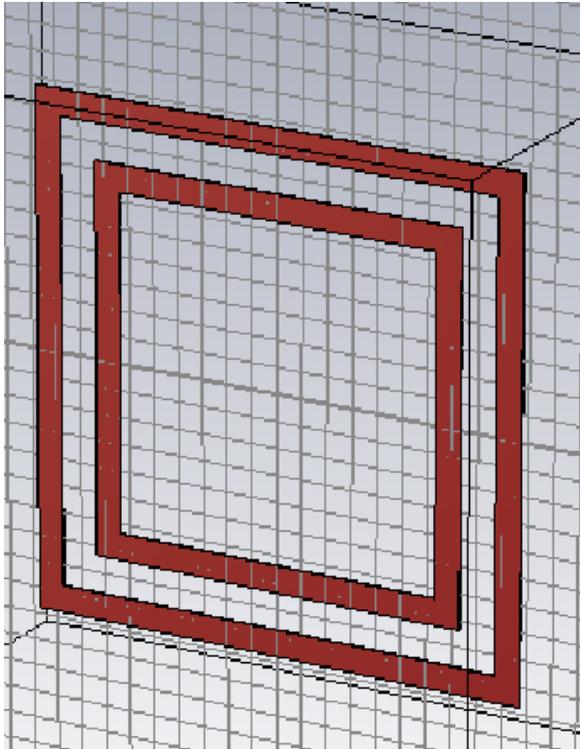


LOS ELEMENTOS EXTERIORES SE SINTETIZAN CON RANURAS
PERO EL CENTRAL ES UNA REACTANCIA

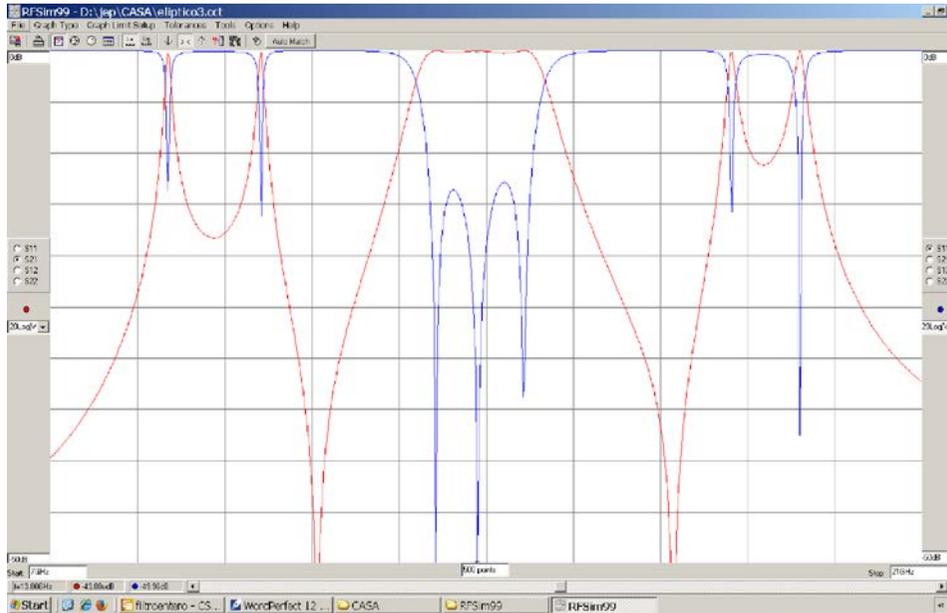
POLO-CERO-POLO-CERO-POLO

¿CÓMO SE SINTETIZA?

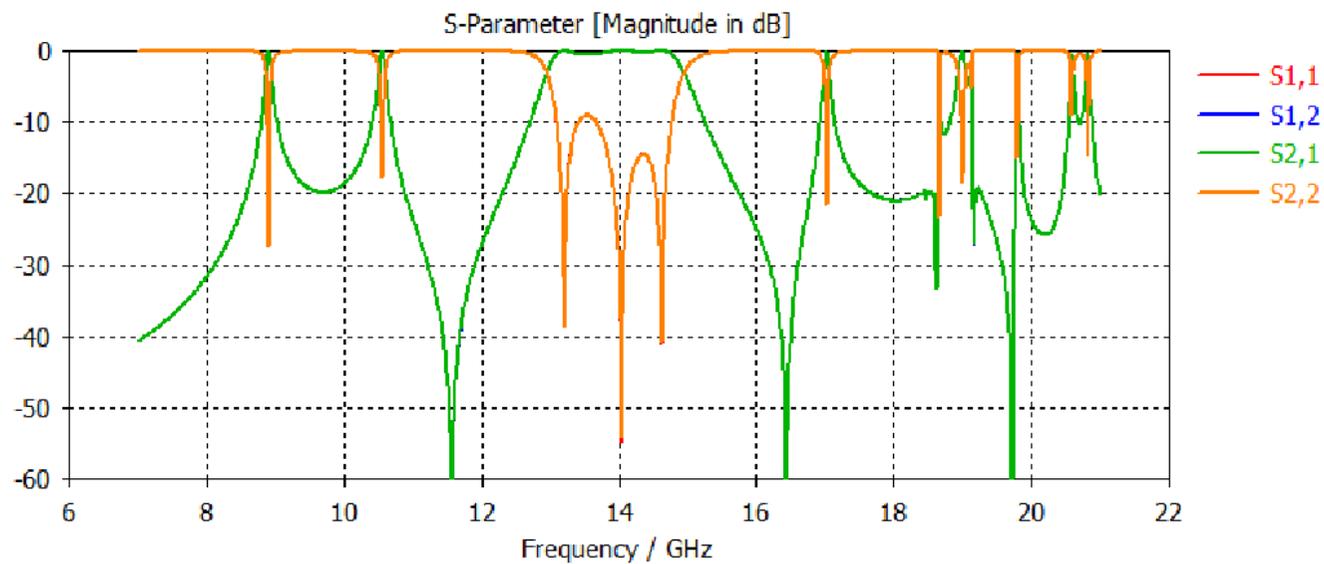
PUES DE VARIAS MANERAS



**EL PROBLEMA ES QUE ESTAS GEOMETRÍAS TIENEN
CADA VEZ MÁS GRADOS DE LIBERTAD
Y SON MÁS DIFÍCILES DE PARAMETRIZAR**



CIRCUITO



SIMULACIÓN

FUNCIONA MUY BIEN EN LA BANDA MONOMODO
¡PERO CON SEPARADORES DE $3\lambda/4$ EN LUGAR DE $\lambda/4$!

FUENTES DE ERROR EN EL PROCESO

EN EL CÁLCULO DE LA SUSCEPTANCIA EQUIVALENTE

La banda de frecuencia utilizada es limitada y el número de dimensiones y frecuencias finito, lo que implica un **error de interpolación**. En la mayor parte de los diseños de interés las inmitancias son de valor alto, lo que obliga a utilizar la interpolación en los extremos de su margen seguro de validez, cuando no en el exterior.

Se ha considerado que los parches son capacidades puras y las aperturas inductancias puras, pero en el parche hay una inductancia residual en serie y en la apertura una capacidad residual en paralelo, que pueden estimarse mediante las frecuencias de resonancia. Aunque no se ha hecho, es posible incorporar **estos parásitos en el circuito equivalente**, lo que implica una mejora de simulación en la zona de frecuencias más altas de la banda considerada.

EL CALCULO NUMÉRICO TIENE ADEMÁS UN ERROR QUE DEPENDE DE LA FINURA DEL MALLADO UTILIZADO

EN LA VALIDEZ DEL CIRCUITO EQUIVALENTE CONJUNTO DE LAS DIVERSAS CAPAS

El circuito equivalente admite que la **interacción entre** los elementos situados en **capas** sucesivas se produce sólo **a través del modo dominante** del sistema de transmisión configurado por las condiciones de periodicidad, en nuestro caso, una biplaca con paredes laterales de conductor magnético perfecto. Si el primer modo superior no está suficientemente atenuado, el efecto de interacción entre capas que añade no está incluido en el circuito equivalente.

Los periodos grandes son convenientes a efectos de conseguir inmitancias altas, pero el efecto del primer modo superior constituye una limitación importante a la hora de elegir su valor.

POR ESO HUBO QUE USAR SEPARADORES DE $3\lambda/4$ EN EL FILTRO ELÍPTICO

EN EL DISEÑO DE LA ESTRUCTURA

La presencia del **sustrato** que soporta el parche o la apertura introduce una incertidumbre en el diseño de la distancia de separación entre capas, dado que se ha supuesto que dicha separación es de vacío pero contiene un tramo, en general corto, de dieléctrico. Por otra parte asumir que la permitividad de los **separadores** es la del vacío es, en muchas ocasiones, tan sólo una aproximación.

La **estructura** real es **finita** aunque en la simulación se la considera infinita. Esto introduce un error muy difícil de evaluar.

La **medida** del comportamiento de estas estructuras es **complicada** y, en general, se ve alterada por elementos no considerados (soportes, etc.)

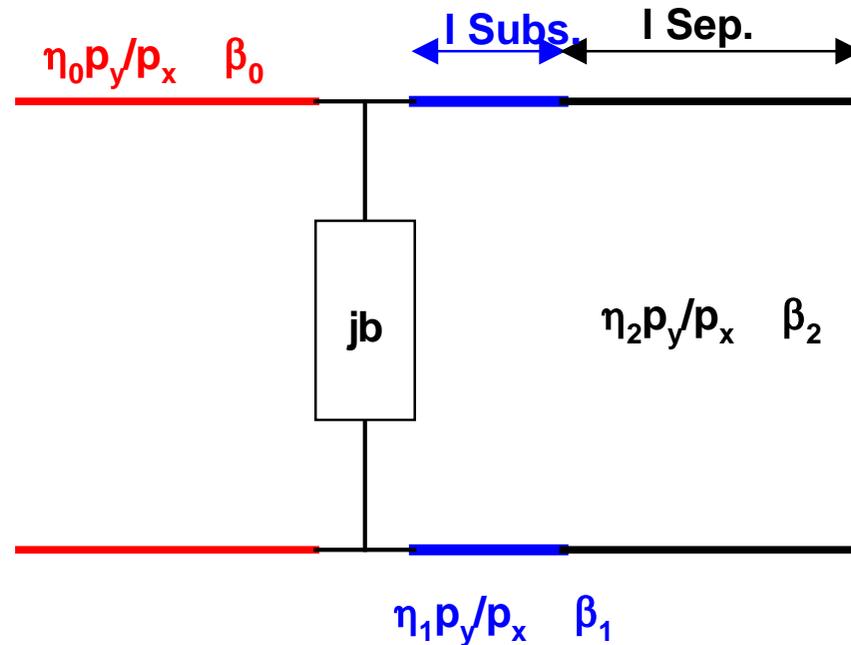
**NO DEBE ESPERARSE UNA EXCELENTE COINCIDENCIA ENTRE
SIMULACIONES Y MEDIDAS**

PRESENCIA DE DIELECTRICOS

ES EVIDENTE QUE LOS DIFRACTORES NO PUEDEN "FLOTAR" EN EL AIRE LUEGO HABRÁ:

- UN SUSTRATO QUE SIRVA PARA SOPORTARLOS, EN GENERAL UNA CAPA DELGADA DE DIELECTRICO DE PERMITIVIDAD RELATIVA PRÓXIMA A 2**
- UN MATERIAL PARA SEPARAR LAS CAPAS, EN GENERAL CON PERMITIVIDAD PRÓXIMA A LA DEL VACÍO**

¿CÓMO INCORPORAMOS SU EFECTO?
EL CIRCUITO EQUIVALENTE PASA A SER



NATURALMENTE LA b EN PRESENCIA DE DIELECTRICOS ES DIFERENTE QUE EN EL CASO DEL VACÍO, PORQUE LA ENERGÍA ALMACENADA EN EL CAMPO ELÉCTRICO HA CAMBIADO

**EN CUALQUIER CASO, LOS DISEÑOS REQUERIRÁN
UN PROCESO DE OPTIMIZACIÓN, PUDIENDO
REALIZARSE UNA BUENA PARTE DEL MISMO A NIVEL
DE CIRCUITO EQUIVALENTE**

**EL ÉXITO DE LA OPTIMIZACIÓN FINAL, A NIVEL DE
SIMULADOR ELECTROMAGNÉTICO, RESULTA ASÍ
PRÁCTICAMENTE GARANTIZADO CON TIEMPOS
DE COMPUTACIÓN RELATIVAMENTE CORTOS**

**A LO LARGO DE ESTA EXPOSICIÓN SE
HAN UTILIZADO CONCEPTOS DE:**

ANÁLISIS Y SÍNTESIS DE CIRCUITOS

- **IMPEDANCIA Y ADMITANCIA. RESONANCIAS**
- **CIRCUITOS DE DOS PUERTAS. CONEXIÓN EN
CASCADA**
- **REALIZABILIDAD DE FUNCIONES REALES POSITIVAS
IMPARES**

ELECTROMAGNETISMO

- **ONDA PLANA. POLARIZACIÓN**
- **SISTEMA DE TRANSMISIÓN. DISCONTINUIDAD**
- **REFLEXIÓN Y TRANSMISIÓN**

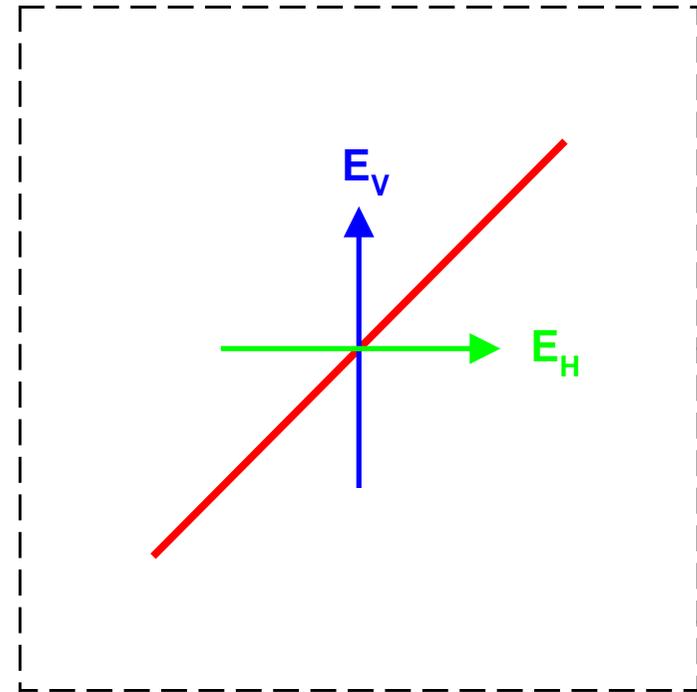
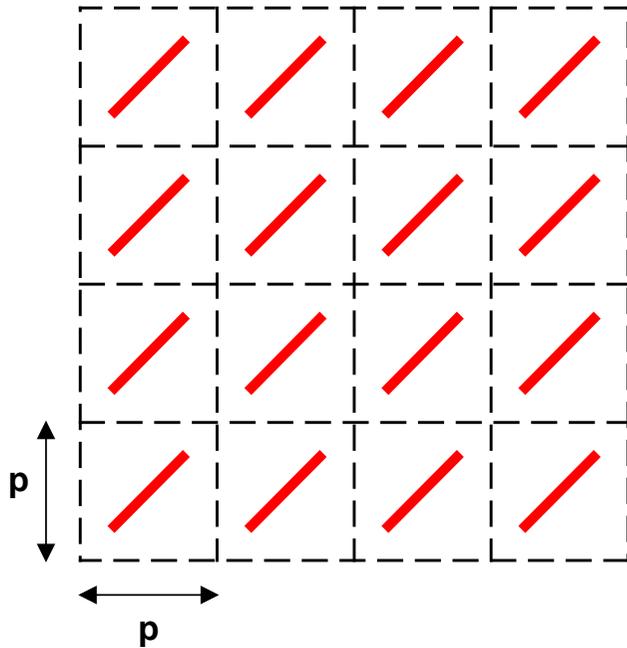
Y MATEMÁTICAS

- **EXTRACCIÓN DE POLOS Y RESIDUOS**
- **INTERPOLACIÓN**
- **MATRICES**

**SIN LOS QUE HUBIESE SIDO IMPOSIBLE
NI SIQUIERA EXPRESARSE**

¿HAY UN "MAS ALLÁ"?

CONSIDEREMOS ESTA SITUACIÓN

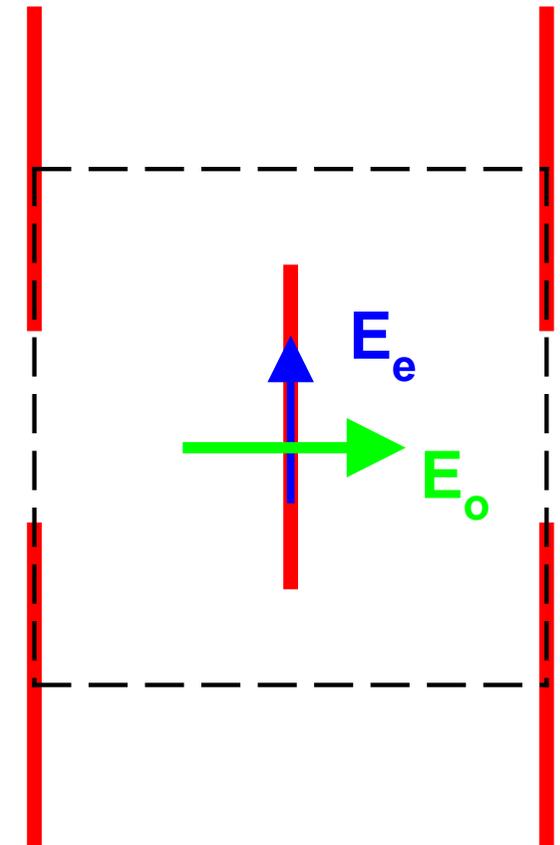
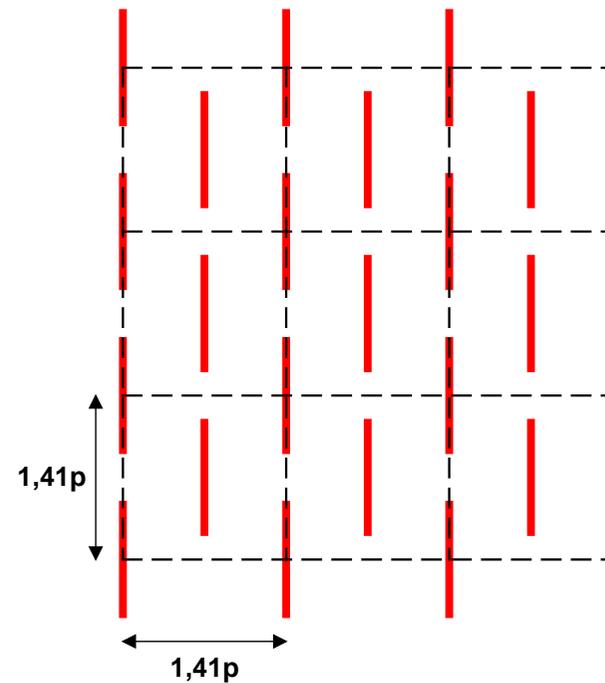
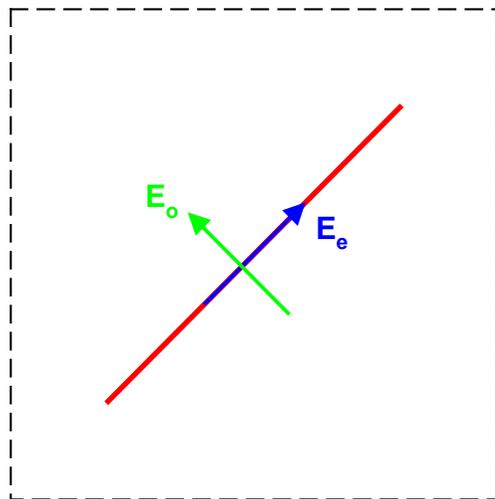


INDUDABLEMENTE LA INCIDENCIA DE E_V PRODUCE E_H
ES UN SISTEMA CON DOS MODOS

ES MUY INTERESANTE PORQUE
¡PUEDE CONVERTIR UNA POLARIZACIÓN EN OTRA!

**¿CÓMO SE DISEÑA? ¿EXISTE UN CIRCUITO EQUIVALENTE?
SI EXISTE DEBERÁ TENER DOS ENTRADAS Y DOS SALIDAS**

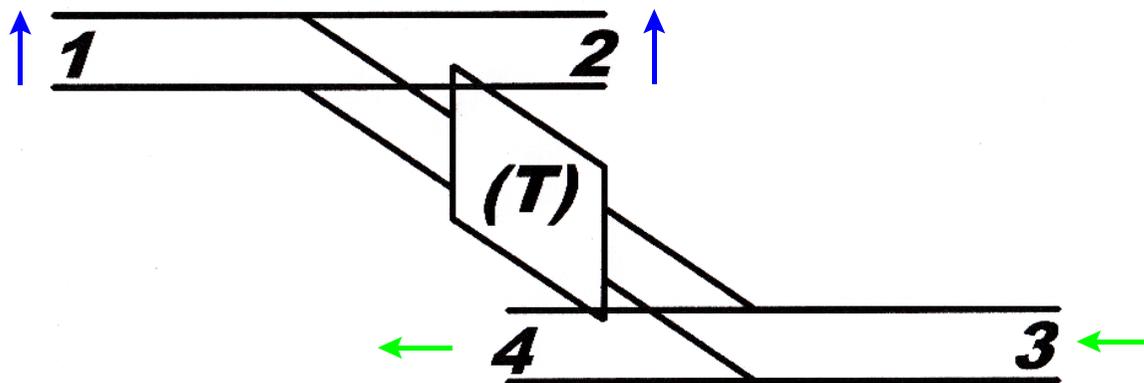
**GIREMOS 45° Y USEMOS UNA PAREJA ALTERNATIVA
(PAR E IMPAR)**



PARA LAS EXCITACIONES PAR E IMPAR SE PUEDEN
ENCONTRAR CIRCUITOS EQUIVALENTES DE DOS PUERTAS

COMBINÁNDOLOS SE OBTIENE UN CIRCUITO EQUIVALENTE DE
CUATRO PUERTAS, QUE DESCRIBE EL COMPORTAMIENTO
PARA CUALQUIER EXCITACIÓN

(TEOREMA DE BARTLETT)



$$\begin{pmatrix} V_1 \\ I_1 \\ V_4 \\ I_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{Y_e + Y_o}{2} & 1 & \frac{Y_e - Y_o}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{Y_e - Y_o}{2} & 0 & \frac{Y_e + Y_o}{2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_2 \\ I_2 \\ V_3 \\ I_3 \end{pmatrix}$$

Y A PARTIR DE AQUÍ SE APLICA LA TEORÍA DE
DISEÑO DE LOS ACOPLADORES "BRANCH LINE"

**MUCHAS DE LAS COSAS QUE SE ESTUDIAN A LO
LARGO DE UNA TITULACIÓN PARECEN DE POCA
UTILIDAD O INTERÉS**

**PERO CONSTITUYEN LOS CIMIENTOS DEL
CONOCIMIENTO SUPERIOR**

**Y NUNCA SABE UNO DONDE SE LAS VOLVERÁ A
ENCONTRAR**

... PERO ANTES O DESPUÉS SE LAS ENCONTRARÁ

**SI VAS A SER PILOTO DE
FORMULA I**

**¡TE CONVIENE SACAR
PRIMERO EL CARNET DE
CONducir!**

¡GRACIAS POR VUESTRA ATENCIÓN!