



Universidad Autónoma de San Luis Potosí.



Facultad de Ciencias

Superficies Fractales Selectivas  
a la Frecuencia

TESIS

Que para obtener el Grado de

Maestro en Ciencias Aplicadas

P R E S E N T A :

Roberto Isaac Muñoz Alvarez

A S E S O R :

Dr. Francisco Javier González Contreras



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE  
SAN LUIS POTOSÍ  
FACULTAD DE CIENCIAS**



**Superficies Fractales Selectivas  
a la Frecuencia.**

---

**Ing. Roberto Isaac Muñoz Alvarez**

**SINODALES:**

---

**Dr. Francisco Javier González Contreras  
(Asesor)**

---

**Dr. Raúl Balderas Navarro**

---

**Dr. Jesus Urías Hermosillo**

A mis padres como un testimonio de  
Infinito aprecio y agradecimiento  
Por toda una vida de esfuerzo y sacrificio  
Brindándome siempre apoyo y cariño  
Cuando más lo necesite.

Deseo de todo corazón  
Que me triunfo lo sientan  
Como el suyo propio con amor  
Admiración y respeto

Roberto Isaac Muñoz Alvarez

## **Agradecimientos.**

Al Dr. Francisco Javier González por la dirección y la paciencia que tuvo para la realización de la Tesis.

A la Lic. Ana Margarita Orellana Moreno por todo el apoyo que me otorgo en todo el proceso de esta tesis y estar a mi lado.

A todos mis amigos que me apoyaron.

Al CONACYT por la beca de postgrado No 182076.

# Índice general

Lista de Figuras	i
Lista de Tablas	iv
1. INTRODUCCIÓN.....	4
1.1 Objetivo.....	5
1.2 Justificaciones.....	6
2. FRACTALES.....	7
2.1 Complejidad infinita.....	9
2.2 Aplicaciones de fractales.....	11
2.3 Aplicaciones de fractales en electromagnetismo.....	13
2.3.1 Características de antenas fractales.....	15
2.3.2 Ventajas de antenas fractales.....	15
2.3.3 Desventajas de antenas fractales.....	15
3. SUPERFICIES FRACTALES SELECTIVAS A LA FRECUENCIA (SFSF).....	17
3.1 Análisis teórico de las SFSF.....	18
3.1.1 Solución de superficies periódicas de dipolos.....	19
3.1.2 El método del potencial vectorial de Hertz.....	24
3.2 Aplicaciones de SFSF.....	29
4. FEMLAB.....	33
4.1 Tutorial para resolver problemas electromagnéticos.....	33
4.1.1 Lentes de Fresnel.....	37
5. SIMULACIONES.....	43
5.1 Dipolo.....	43

5.2	Arreglo de Cuadrados.....	49
5.3	Circuito RLC.....	53
5.4	Fractal de Minkowski.....	57
5.5	Fractal de Sierpinski.....	62
5.6	Fractal de Dipolo Cruzado.....	66
5.7	Fractal de Koch.....	70
6.	CONCLUSIONES.....	74
6.1	TRABAJO A FUTURO.....	75
7.	REFERENCIAS.....	76

## Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> - Primer Fractal.....	8
<b>Figura 2</b> - Fractal de Koch.....	9
<b>Figura 3</b> - Ejemplo de una superficie selectiva a la frecuencia.....	14
<b>Figura 4</b> - Ejemplo de Antenas.....	16
<b>Figura 5</b> - Arreglo de SSF.....	19
<b>Figura 6</b> - Graficas de la función K.....	23
<b>Figura 7</b> - Grafica del coeficiente de transmisión y reflexión.....	24
<b>Figura 8</b> - Ecuaciones de Maxwell.....	30
<b>Figura 9</b> - Diagrama esquemático de una célula de la simulación.....	34
<b>Figura 10</b> - Espacio de simulación analizando un arreglo de SFSF metálicas.....	35
<b>Figura 11</b> - Espacio de simulación analizando usando la discretización.....	36
<b>Figura 12</b> - La difracción debido a un solo borde de Fresnel.....	38
<b>Figura 13</b> - Radio de Fresnel depende de la raíz cuadrada de enteros.....	39
<b>Figura 14</b> - anillos de Fresnel.....	40
<b>Figura 15</b> - Simulación de una frecuencia de 7 Giga Hertz.....	41
<b>Figura 16</b> - Difracción a una frecuencia de 10 Giga Hertz.....	42
<b>Figura 17</b> - Dipolo la rejilla genera un filtro rechazo de banda.....	44
<b>Figura 18</b> - Frecuencias de resonancia cuando el dipolo cambia de ancho.....	45
<b>Figura 19</b> - Frecuencias de resonancia cuando el dipolo cambia de longitud.....	46
<b>Figura 20</b> - Simulación en FEMLAB de un dipolo de 13.25mm de longitud.....	46
<b>Figura 21</b> - Grafica de la publicación análisis de superficies selectivas a la Frecuencia.....	47
<b>Figura 22</b> - Grafica con la figura del Dipolo de la simulación en Femlab.....	48
<b>Figura 23</b> - Elemento que genera un filtro rechazo de banda.....	49
<b>Figura 24</b> - Frecuencia de resonancia del arreglo de cuadrados.....	50

<b>Figura 25</b> - Simulación en FEMLAB campo eléctrico a una frecuencia de 19 Giga Hertz.....	50
<b>Figura 26</b> - Grafica de la publicación Self-Similar Prefractal Frequency Selective Surfaces For Multiband and Dual polarized Applications.....	51
<b>Figura 27</b> - Grafica con la figura del Arreglo de cuadrados de la simulación en Femlab.....	52
<b>Figura 28</b> - Elemento Circuito RLC.....	53
<b>Figura 29</b> - Longitud de onda resonante del Circuito RLC.....	54
<b>Figura 30</b> - Simulación en FEMLAB campo eléctrico a una frecuencia de 1 Giga Hertz.....	54
<b>Figura 31</b> - Grafica de la publicación Infrared Frequency Selective Surface Based on Circuit-Analog Square Loop Design.....	55
<b>Figura 32</b> - Grafica con la figura del Circuito RLC de la simulación en Femlab.....	56
<b>Figura 33</b> - Fractal de Minkowski genera dos rechazos de banda.....	58
<b>Figura 34</b> - Frecuencias de resonancia del fractal de Minkowski.....	59
<b>Figura 35</b> - Simulación en FEMLAB del Fractal de Mikowski del campo eléctrico a 11 Giga Hertz.....	59
<b>Figura 36</b> - Grafica de la publicación Self-Similar Prefractal Frequency Selective Surfaces For Multiband and Dual polarized Applications.....	60
<b>Figura 37</b> - Grafica con la figura del Fractal de Minkowski de la simulación en Femlab.....	61
<b>Figura 38</b> - Fractal de Sierpinski genera dos rechazos de banda.....	63
<b>Figura 39</b> - Frecuencias de resonancia del Fractal de Serpinski.....	63
<b>Figura 40</b> - Simulación en FEMLAB del Fractal de Sierpinski del campo eléctrico a 16 Giga Hertz.....	64
<b>Figura 41</b> - Grafica de la publicación Self-Similar Prefractal Frequency Selective Surfaces For Multiband and Dual polarized Applications.....	64
<b>Figura 42</b> - Grafica con la figura del Fractal de Sierpinski de la simulación en Femlab.....	65
<b>Figura 43</b> - Fractal de Dipolo de cruz genera dos rechazos de banda.....	66
<b>Figura 44</b> - Frecuencias de resonancia usando el método del elemento finito Frecuencia contra potencia transmitida en Db.....	67
<b>Figura 45</b> - Simulación en FEMLAB del Fractal de Dipolo de cruz del campo eléctrico a 8 Tera Hertz.....	67
<b>Figura 46</b> - Grafica de la publicación Self-Similar Prefractal Frequency Selective Surfaces For Multiband and Dual polarized Applications.....	68



<b>Figura 47</b> - Grafica con la figura del Fractal de Dipolo de cruz de la simulación en Femlab.....	69
<b>Figura 48</b> - Fractal de Koch genera dos rechazos de banda.....	70
<b>Figura 49</b> - Frecuencias de resonancia del Fractal de Koch.....	71
<b>Figura 50</b> - Simulación en FEMLAB del Fractal de Koch del campo eléctrico a 9 Giga Hertz.....	71
<b>Figura 51</b> . Grafica de la publicación Fractal FSS: Various Self-Similar Geometries Used for Dual-Band and Dual-Polarized FSS.....	72

## Lista de Tablas

Tabla. 1. Iteración de números complejos.....	10
Tabla. 2. Frecuencia de resonancia y longitud de onda resonante en función de la longitud del dipolo.....	44

## Capítulo 1

### INTRODUCCIÓN.

Las Superficies Fractales Selectivas a la frecuencia (SFSF) han llegado a ser importantes en los últimos años para una variedad de aplicaciones científicas, industriales y militares que van desde la comunicación de señales para celulares hasta las de un jet militar.

Las SFSF son pantallas con aberturas metálicas que pueden ser usadas como filtros de microondas. Al incidir el campo eléctrico sobre las SFSF induce una corriente lo que permite transmitir o bloquear ciertas frecuencias.

Una SFSF es una superficie que exhibe diferentes propiedades de reflexión y / o transmisión en función de la frecuencia[1], estas SFSF consisten de arreglos periódicos de elementos de parches o aberturas. Pueden ser diseñados para exhibir alta reflectancia o transmitancia en ciertas longitudes de onda dependiendo del tamaño y de la configuración de los elementos que forman el arreglo[2].

Muchos autores han analizado arreglos periódicos con varios métodos numéricos tales como el método del elemento finito[3], el método de admitancia [4][5], el método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD)[6] y el método del potencial vectorial de Hertz [7].

Para la simulación se utilizó el software FEMLAB que tiene un ambiente interactivo, está basado en el método del elemento finito (FEM) y puede ser utilizado para

modelar aplicaciones científicas y de ingeniería basadas en ecuaciones diferenciales parciales, ofrece un completo sistema multi-físico que modela el ambiente donde se puede solucionar simultáneamente cualquier problema de física [8].

FEMLAB se utilizó para obtener las características de transmisión de un arreglo periódico de SFSF metálicos en función de la frecuencia. Primero se hicieron pruebas con una superficie selectiva a la frecuencia como es el dipolo, por ser una superficie fácil de comprender, para poder realizar una investigación más completa sobre las SFSF

Para poder ver las resonancias de las SFSF es necesario ver los coeficientes de transmisión o reflexión, en esta tesis se analizó el coeficiente de transmisión para las diferentes superficies.

Una de las principales ventajas de las SFSF debido a su diminuto tamaño es el ahorro de espacios y el poder trabajar con longitudes de onda pequeñas como el infrarrojo.

## **1.1 Objetivo.**

El objetivo de esta tesis es Crear una metodología basada en simulaciones que facilite el diseño de SFSF. Esta metodología utiliza simulaciones en 3D de superficies fractales selectivas a la frecuencia (SFSF). Para la simulación se utilizó el software FEMLAB. Las gráficas resultantes de coeficientes de transmisión se compararon con resultados publicados. Crear una metodología basada en simulaciones que facilite el diseño de SFSF.

## **1.2 Justificaciones.**

Este trabajo de tesis pretende incursionar en el campo de las Superficies Fractales Selectivas a la Frecuencia por medio de la simulación utilizando el método del elemento finito. Utilizar un programa comercial para analizar SFSEs facilitará su diseño y permitirá comprender mejor el funcionamiento de las mismas sin tener que recurrir a la fabricación y experimentación que son procesos tardados y costosos.

## Capítulo 2

El objetivo del presente capítulo es dar una generalidad del concepto de fractal. De manera específica se trata las geometrías fractales más comunes y su generación a través de iteraciones.

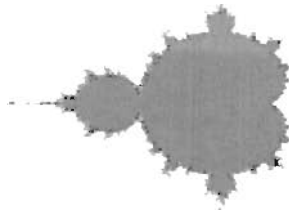
### FRACTALES

Los fractales son figuras geométricas, al igual que los triángulos y los rectángulos, pero con unas propiedades especiales que los distinguen de éstos. Primero, son muy complejos, a cualquier tamaño. Tienen auto similitud, es decir, que pueden dividirse en partes que son copias reducidas del total. Su dimensión es fraccional a diferencia de otras figuras geométricas que tienen dimensión entera [10].

Los fractales frecuentemente se pueden encontrar en la naturaleza. Muchos objetos naturales, como los helechos, copos de nieve, las costas de los países, rocas, tienen formas parecidas a los fractales. No son fractales auténticos pues su complejidad no es infinita. Una cosa interesante de los fractales es que su estudio es nuevo. Muchas áreas de las matemáticas son basadas en conocimiento antiguo. La geometría, por ejemplo, la inventó Euclides en el año 300 AC. Los fractales, por el contrario, están siendo estudiados e investigados en la actualidad. La geometría fractal fue descubierta alrededor del año 1970, por el matemático polaco Benoit Mandelbrot [11].

Existen dos características propias de los fractales. Estas son importantes para comprender su estructura y su comprensión. Primero, su Área o Superficie es finita, es decir, tiene límites. Por el contrario y por paradójico que esto resulte, su perímetro o longitud es infinita, es decir, no tiene límites. Un fractal puede ser una serie de circunferencias que se

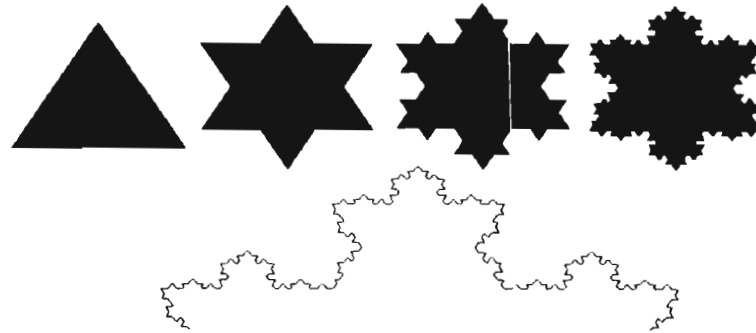
colocan una sobre el radio de la otra como si fuera su diámetro y así infinitamente. El área sería siempre semejante o aproximada a la de la circunferencia mayor, pero su longitud (considerándolas no como figuras independientes, sino como todas una sola), sería infinita, se mostrara en la figura 1, el primer fractal:



**Figura 1.** Primer fractal

Este es el *CONJUNTO DE MANDELBROT* su nombre deriva de su descubridor y el además considerado padre de la Geometría Fractal, el matemático polaco *BENOIT MANDELBROT*. Pero no todos los méritos en el descubrimiento de los Fractales le son debidos a él, sino que también a otro gran matemático, como fue el francés *GASTON MAURICE JULIA*. Estos dos matemáticos han sido los que más han aportado en el mundo de las investigaciones sobre fractales. Sus historias son muy peculiares y, en cierto modo, ninguno de ellos quiso descubrir los fractales, digámoslo en forma retórica que los fractales son una hermosa casualidad [12].

Ahora bien. Introduzcamos un nuevo concepto que no ha de ser ajeno al estudio de fractales: *ITERACIÓN*. Una iteración es la repetición de "algo" una cantidad "infinita" de veces. Entonces, los fractales se generan a través de iteraciones de un patrón geométrico establecido como fijo. El mejor y más claro ejemplo que usted puede observar de este tipo de concepto es el siguiente:



**Figura 2.** Fractal de koch

En la imagen, la figura representada es conocida como el *COPO DE NIEVE DE KOCH* O *LA ISLA TRIADA DE KOCH* y se forma a partir de un triángulo equilátero al cual se dividen sus lados en tres partes iguales, de forma tal que en los tercios medios se coloca otro triángulo semejante al primero. Esta iteración, en un alto grado de complejidad, se asemejará a una circunferencia, ya que los triángulos se irán colocando infinitamente. Esto reafirma el concepto de área finita y Perímetro infinito. Claro está que los fractales son también números (en efecto, la iteración de un número Complejo simple, por lo que pueden traducirse en *operaciones matemáticas*).

## **2.1 Complejidad infinita.**

La generación propiamente tal de un fractal se puede hacer de muchas maneras, pero matemáticamente, se define como la repetición constante de un cálculo simple denominado iteración. Una fórmula sencilla para objetos geométricos proveniente del concepto de dimensión de Hausdorff-Besicovitch



$$D_H = \frac{\log(N)}{\log(P/p)}$$

N: Número de unidades

P: Tamaño del Objeto

p: Tamaño de la unidad

El Conjunto de Mandelbrot es mucho más complejo, que la imagen vista anteriormente. Pero su generación es lo interesante. El Conjunto de Mandelbrot se forma mediante un *NUMERO COMPLEJO* ( $a+bi$ , A y B nros. Reales;  $i$ =unidad imaginaria) que se dice "especial". Entonces, tenemos el número complejo  $Z = a+bi$ , al cual se lo somete a una "prueba matemática". Para ello tomamos el número  $Z$  y lo elevamos al cuadrado, sumándole después al mismo  $Z$ . Luego, elevamos ese resultado y lo elevamos nuevamente al cuadrado, sumádoselo a  $Z$  y así infinitamente (iteración). Representemos esto:

NÚMERO $C = a + bi$ (complejo).	
Primera iteración	$Z^2 + Z$
Segunda iteración	$(Z^2 + Z)^2 + Z$
Tercera iteración	$((Z^2 + Z)^2 + Z)^2 + Z$

Tabla. I. Iteración de números complejos

El esquema anterior nos muestra el caso mencionado. Se toma un número complejo y se le somete a un proceso matemático "simple", tal como es elevarlo al cuadrado y

sumarlo consigo mismo. Este proceso, iterado, transforma ese número complejo "simple" en uno infinitamente intrincado. Aún así, si usted no comprende estos cálculos, no se preocupe, ya que por su complejidad el Conjunto de Mandelbrot, por ejemplo, ha sido generado a través de computadoras, en este caso de la IBM [12].

Ahora que se han analizado todas las definiciones concluiremos que la definición de fractal es: Una figura geométrica compuesta por fragmentos de si misma en una infinita variedad de tamaños, son auto semejantes, una de sus características es que puede tener dimensión fraccionaria.

## **2.2 Aplicaciones de fractales.**

Los fractales, como ya sabemos, son números Complejos infinitamente extensos (por no decir complejos, aunque suene extraño).

Las imágenes fractales son generadas por computadoras, ya que estos pueden realizar cálculos tan complejos como el que se realiza en esta tesis, pero cabe tener en cuenta que lo representado no es propiamente un fractal, ya que por poderosa que sea la máquina, un fractal es infinito y una computadora no puede realizar un cálculo infinitas veces. En el caso del Conjunto de Mandelbrot, este se realiza en un plano bidimensional de números Complejos. Todos los números que al ser iterados se mantienen "relativamente pequeños" se dice que pertenecen al Conjunto de Mandelbrot. Estos números son representados por la computadora con color negro. Los demás puntos, es decir, los que no pertenecen al Conjunto de Mandelbrot, se representan dependiendo de su rapidez de iteración, esto es, el menos rápido se representa con amarillo, anaranjado, etc., y el más

rápido, en colores celeste, azul, azul oscuro y así. En este caso, el mejor de los colores es el negro.

En el caso de las aplicaciones de los fractales, se cuenta, dentro del campo computacional, el proceso de *TRANSFORMACIÓN FRACTAL*, el que se realiza con imágenes que contienen muchos píxeles. Cada uno de estos se va "agrandando", por así decirlo, "infinitamente", sin dejar de ser el mismo (en el sentido de patrón geométrico, ya que un píxel es de forma cuadrada), lo que permite que, en términos de memoria, el espacio ocupado sea menor. Además, como podrá ver más adelante, se utilizan para generar efectos en programación y otras cosas tan inusuales como la Música Fractal. Tienen la propiedad de modelar bastante bien la naturaleza. Pueden usarse para generar paisajes, marcos de montañas, terrenos corrugados, alas, plantas, incluso también tiene aplicaciones en la música y el procesamiento digital de señales [13].

Durante la última década, investigadores han empezado a aplicar fractales para diseños de antenas. Las propiedades de los fractales, antes expuestas, se aprovechan en la construcción de antenas que pueden obtener anchos de banda de 10 a 40% de la frecuencia central superiores a las antenas clásicas (de 10% a 20% de  $f_c$ ), patrones de radiación estables y gran número de bandas determinado por el número de iteraciones del fractal. Las antenas parecen ser simples juegos geométricos, pero implican un conocimiento profundo del electromagnetismo [14].

Otra aplicación se da en el campo de la Geología y Topología. Considerando un litoral cualquiera, con todas sus estribaciones, se dice que tiende a una longitud infinita, siendo su área finita (características propias de un fractal). Además, Mandelbrot propuso que galaxias y otros cuerpos semejantes se regían por el mismo concepto. El genial Mandelbrot, en su libro "La Geometría Fractal de la Naturaleza", señala

parafraseando: "¿Por qué a menudo se describe la geometría como algo frío y árido? Sí, es incapaz de describir la forma de una nube, una montaña, una costa o árbol, porque ni las nubes son esféricas ni las montañas cónicas o un árbol cilíndrico". Es pues, un hombre sabio, ya que adelante nos muestra como la matemática es parte de nuestras vidas, sino una misma de ellas. La geometría fractal permite explicar diversos fenómenos naturales y su buen entendimiento y comprensión son factores que hoy en día se aprecian mucho [12].

### **2.3 Aplicaciones de fractales en electromagnetismo.**

A finales del siglo 18, el Dr. Ritenhouse encontró que algunos colores del espectro de la luz de una lámpara de la calle desaparecían cuando se observa a través de un pañuelo transparente. Esta fue la primera prueba de una superficie continua que pudiera tener transmitancia para diferentes frecuencias de una onda incidente y la superficies fueron llamadas superficies selectivas a la frecuencia [15].

Mas tarde las superficies selectivas a la frecuencia aparecieron en el rango de las radiofrecuencias en 1919 por, G. Marconi y B. Franklin usaron reflectores construidos de forma horizontal formados en una superficie parabólica, esto produjo una superficie reflectiva que fue limitada a una frecuencia [16].

Son muy pocos los que han trabajado con superficies fractales selectivas a la frecuencia pero aquí daremos algunas explicaciones. Una superficie selectiva a la frecuencia es una estructura periódica plana que tiene una respuesta en frecuencia característica.

Una superficie selectiva de la frecuencia, en general, depende de la frecuencia de la onda incidente, del ángulo incidente, y de su polarización. Varias iteraciones del fractal se pueden utilizar para diseñar SSF que tiene una respuesta en frecuencia de varias bandas.

Un arreglo periódico metálico en un sustrato, constituye una superficie selectiva de la frecuencia (SSF) de las ondas electromagnéticas. En las longitudes de onda de la microonda, estas estructuras son fáciles de fabricar y de emplearse en el diseño de una antena. Como siempre, en las longitudes de onda cercano-infrarrojas, el tamaño de elementos en SSF está en orden de un micrómetro, haciendo tales estructuras mucho más difíciles de fabricar. Los avances en técnicas de litografía durante la década pasada no han prohibido la construcción de estructuras periódicas, con tamaños del elemento de menos de un micrómetro. La construcción de los filtros de SSF para el régimen de la longitud de onda cercano-infrarrojo es difícil pero no imposible de fabricar. Las técnicas avanzadas de hoy permiten fabricar SSF que funcionen en un régimen óptico [17].



**Figura 3.** Ejemplo de una superficie selectiva a la frecuencia

Actualmente se están aplicando extensivamente las antenas fractales obteniéndose muy buenos resultados en cuanto a eficiencia, espacio, ancho de banda y ganancia.

La aplicación de los fractales a las antenas permite la optimización en tamaño y ganancia para arreglos banda múltiple y banda estrecha. El hecho de que muchos fractales tengan

complejidad infinita puede ser usado para reducir el tamaño de la antena y desarrollar antenas de bajo contorno [18].

### **2.3.1 Características de Antenas Fractales**

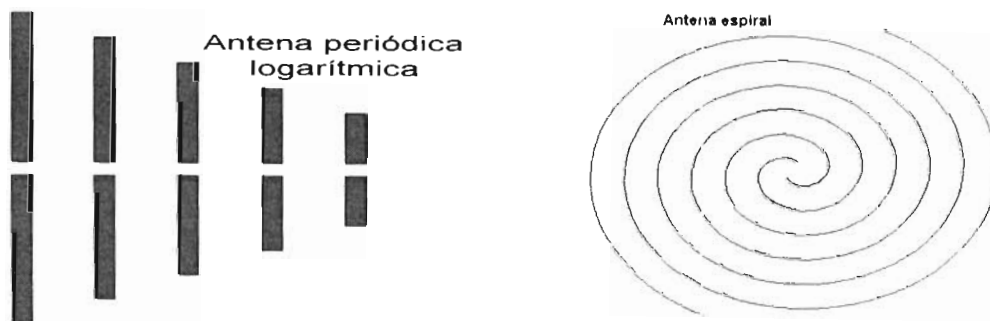
Un gran ancho de banda, radian muy eficazmente para una gama amplia de frecuencias. El rango de frecuencia es especificada por el tamaño más pequeño y más grande presente en la antena. Tienen una ganancia considerable, por encima de un antena dipolo normal y depende muy poco de la frecuencia en un rango de frecuencias grande. Poseen una estructura espacial que se relaciona a la ganancia de la antena. Esta estructura espacial puede ser muy útil cuando se requiere direccionalidad [19].

### **2.3.2 Ventajas de Antenas Fractales.**

Tienen área pequeña y una Impedancia de acople estable para un rango amplio de frecuencias. Contienen una Resonancia múltiple y Gran ganancia en algunos casos

### **2.3.3 Desventajas de Antenas Fractales**

Su diseño y fabricación es más difícil y tienen baja ganancia en algunos casos. En 1997 el grupo *ELECTROMAGNETICS & PHOTONICS ENGINEERING* de la Universidad de Cataluña con la compañía *SISTEMAS RADIANTES F. MOYANO S.A.* desarrollaron las antenas *FRACTUS* multi-banda para sistemas Móviles Celulares.



**Figura 4.** Ejemplo de antenas

## Capítulo 3

Una vez habiendo introducido el concepto de la generación de antenas fractales, en este capítulo nos enfocamos a las SFSF con la particularidad de aplicación de THz y GHz.

### **SUPERFICIES FRACTALES SELECTIVAS A LA FRECUENCIA (SFSF).**

Las superficies fractales selectivas a la frecuencia son estructuras utilizadas como filtros electromagnéticos. El campo eléctrico induce una corriente al pasar por las SFSF son modeladas en ondas electromagnéticas y su aplicación es de una onda armónica donde esta función puede ser representada por senos y cósenos.

El comportamiento de las SFSF son de múltiples resonancias, donde las frecuencias tienen difracción y las longitudes de onda dependen del diseño del filtro. El comportamiento de la frecuencia sobre las SFSF dependen de la forma del elemento (abertura), su tamaño, espacio y el grosor del metal. Las formas más comunes son: circular, rectangular, dipolo, dipolo de cruz, anillo etc.

Tienen características dieléctricas como la permitividad relativa y la permeabilidad relativa (que es el aire  $\epsilon_r = 1$  y  $\mu_r = 1$ ), y en el metal tiene una conductividad  $\sigma = 10e^7$  (cobre).

Se diseñan SFSF para dejar pasar ciertas frecuencias y no hagan interferencias sobre las demás señales que se encuentran en el medio.



La superficie permite transmitir o bloquear las frecuencias, por medio de la excitación de sus elementos . Un arreglo metálico con aire es similar a un circuito capacitivo y un arreglo de aire con metal es similar a un circuito inductivo.

El campo en la onda plana esta formada por una onda TEM donde el campo eléctrico y el campo magnético están en un mismo plano y a su vez es perpendicular al vector de propagación.

Algunas de las **ventajas** para las SFSF es que permite transmitir o bloquear frecuencias, como pueden ser en infrarrojos, microondas, para que no haya interferencia en el medio. Son diseñadas para exhibir alta transmitancia y reflectancia para las longitudes de onda en milímetros y son usados para ahorrar energía.

Para las **desventajas** tenemos que dependiendo de forma del elemento algunas señales pueden distorsionarse. En algunas señales hay ruido que se tiene que estabilizar el sistema.

### **3.1 Análisis teórico de superficies fractales selectivas a la frecuencia.**

El razonamiento siguiente detallará un arreglo periódico de superficies selectivas a la frecuencia, estas *SUPERFICIES FRACTALES SELECTIVAS A LA FRECUENCIA* se diseñan para alterar el contenido espectral de la radiación recibida o emitida por la superficie. En este trabajo, todos los elementos de SFSF se asumen que son idénticos.

La operación teórica de un arreglo de SSF de dipolos de una corriente inducida y el método del potencial vectorial de Hertz se explica aquí por el acercamiento que existe sobre las

simulaciones del capítulo 5. Una explicación rigurosa y extensa de la teoría de SFSF son detalladas en [ 7 ] y [ 23 ] para estas dos técnicas.

La información de estas derivaciones no se agrega dentro de esta investigación, los detalles de estas derivaciones se omiten en gran parte. Sin embargo, el desarrollo de las ecuaciones para determinar las características de una superficie es anunciado en esta sección.

Estas técnicas teóricas son el procedimiento de análisis que se utiliza para simular y para analizar un arreglo periódico, según lo discutido en la sección 4.1. En este método matemático, el arreglo de SSF se modela como un solo elemento de la referencia que se repita periódicamente en un espaciado fijo. Este desarrollo teórico se basa en ese mismo acercamiento.

Estos métodos se pueden ampliar para discutir aberturas en una capa que se conduce por la dualidad; las impedancias, los campos eléctricos y las corrientes eléctricas asociados a un arreglo del elemento que se conduce por admitancias, campos magnéticos y corrientes magnéticas en el caso de un arreglo de aberturas.

### 3.1.1 Solución de superficies periódicas de dipolos

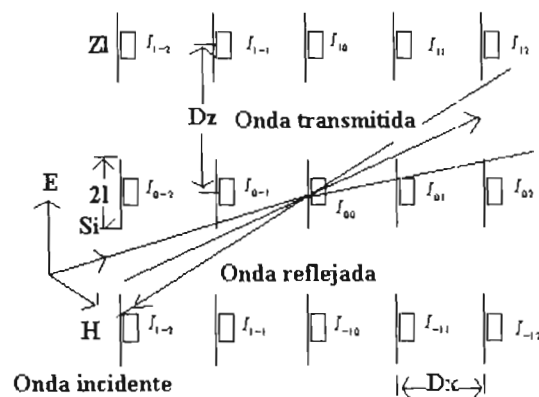


Figura 5. Arreglo de SSF

La solución de un arreglo periódico pasivo se muestra en la figura 5, y consiste en un arreglo de  $(2R + 1)$ , tienen una carga con una impedancia  $Z_L$ , en cada renglón se encuentra  $(2K + 1)$  separadas cada columna por una distancia  $D_x$ , y tienen una separación  $D_z$  de cada renglón (su polarización es en  $Y$  y la dirección del campo eléctrico se encuentra en  $Z$ ), un ángulo de incidencia  $\phi_i$ .

Se induce una corriente en  $I_{rk}(z)$  en cada elemento para un arreglo infinito, debido que se asume que  $(R, K \gg 1)$ , también tiene un retardo de fase lineal por la onda incidente, por lo tanto obtenemos que:

$$I_{rk}(Z) = I_{00}(z) \exp(-j\beta k D_z \sin \phi_i) \quad (1)$$

para el cual  $\beta = 2\pi / \lambda$  es el numero de onda en el espacio libre,

$$I_{00}(z) = I_{00}^s f(z) + I_{00}^t g(z) \quad (2)$$

donde  $f(0) = g(0) = 1$ , así el término de la corriente del elemento  $00th$  es

$$I_{00}(0) = I_{00}^s + I_{00}^t \quad (3)$$

Para encontrar  $I_{00}^s$  y  $I_{00}^t$  se utiliza el teorema del circuito, cuando se induce  $I_{00}^s$  el espaciamiento es pasivo y el elemento se encuentra en corto circuito, y cuando se induce  $I_{00}^t$  la transmisión se activa y el elemento se encuentra en circuito abierto.

$$I_{00}(0) = I_{00}^s(0) - \frac{Z_l I_{00}(0)}{Z_A} \quad (4)$$

Donde  $Z_A = R_A + jX_A$  es la impedancia de un elemento del arreglo, es examinado en la dirección  $\phi_i$ , de las formulas (2) y (4) es

$$I_{00}(z) = I_{00}(0) \left[ \frac{Z_l + Z_A}{Z_A} f(z) - \frac{Z_l}{Z_A} g(z) \right] \quad (5)$$

La longitud efectiva  $2le = 2(l + \Delta l)$ , es inducida por la capacitancia final de que los elementos son lineales.

Cada elemento tiene una fracción de potencia.

$$P_{\max}^E = \frac{P_{\max}^A}{N} = \frac{\lambda^2}{4\pi N} G S_i \quad (6)$$

Donde el numero total de elementos  $N$  es  $(2R+1)(2K+1)$ ,  $G$  es el arreglo examinado en la dirección  $\phi_i$ ,  $Z_l = Z_A^*$  y  $S_i$  es el índice de densidad de potencia.

$$P_{\max}^k = \frac{|V_{rk}|^2}{4R_A} \quad (7)$$

Donde  $V_{rk}$  es inducido por thevenin y es determinado por (7) y (8) y substituyéndolos determinamos  $I_{rk}$ .

$$I_{rk} = \frac{V_{rk}}{Z_A + Z_L} = \frac{\lambda}{|Z_A + Z_L|} \left( \frac{GR_A S_L}{\pi N} \right)^{1/2} \quad (8)$$

substituyendo  $|I_{00}(0)|$  de (10) a (6) con esto ya todas las características del arreglo son conocidas excepto la constante de fase, la evaluación para la zona de campo de esparcimiento para la sección del plano  $XY$  es

$$\sigma = \frac{120NR_A G \lambda^2}{\pi |Z_A + Z_L|^2} \left| F_{e1} - \frac{Z_L}{Z_A} F_{e2} \right|^2 \left[ \frac{\sin \left[ (BD_X / 2)(2k+1)(\sin \phi_i - \sin \phi_s) \right]}{(2k+1) \sin \left[ (BD_X / 2)(\sin \phi_i - \sin \phi_s) \right]} \right]^2 \quad (9)$$

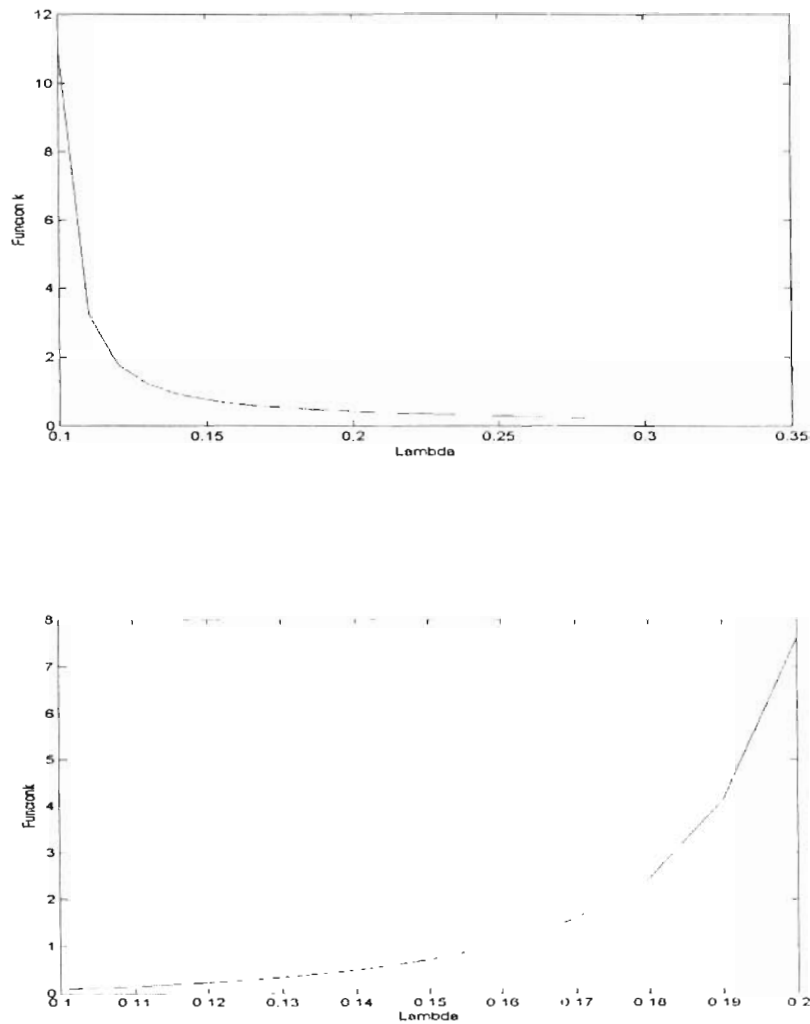
Un coeficiente de reflexión para este arreglo es definido por

$$\frac{1}{R} = k \left( \frac{l}{\lambda}, \frac{l_c}{\lambda}, \frac{Z_L}{Z_A} \right) \left( \frac{D_x D_z}{l l} \cos \phi_i \right)^2 |Z_A + Z_L|^2 \quad (10)$$

donde

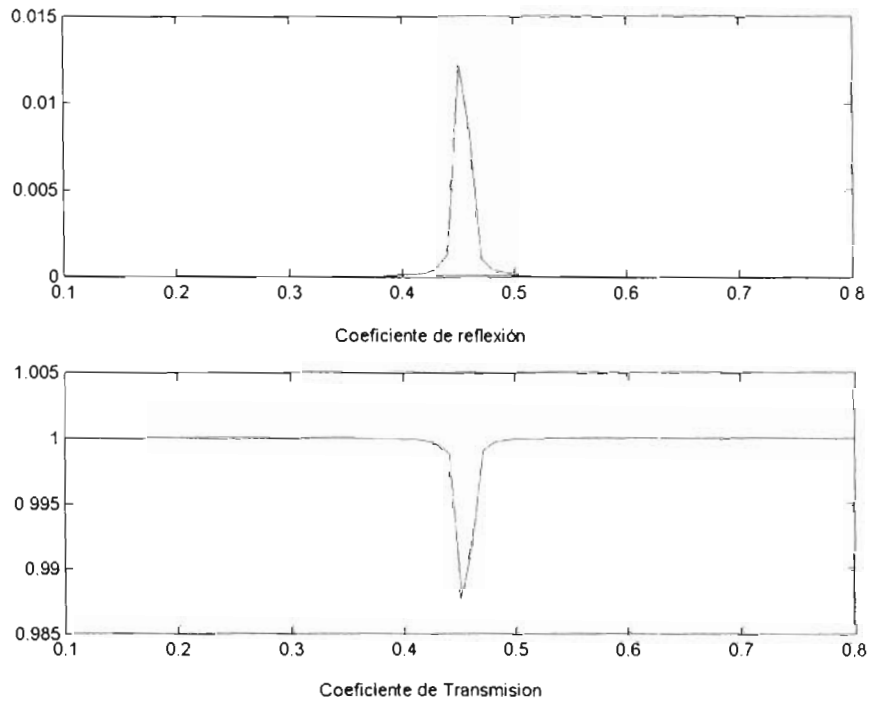
$$k \left( \frac{l}{\lambda}, \frac{l_c}{\lambda}, \frac{Z_L}{Z_A} \right) = \frac{\pi^2 \left( \frac{1}{\lambda} \right)}{3600 \left| F_{e1} - \left( \frac{Z_L}{Z_A} \right) F_{e2} \right|^2 \left[ \frac{\cos \beta \Delta l - \cos \beta l_c}{\sin \beta l_c} \right]}$$

Donde la función de  $k$  es mostrada en la figura 5 para  $Z_L = 0, l_e = 1.1l$  y  $Z_L = j225 \tan \beta l, l_e = 1.3l$  el rango de  $1/\lambda$  es relevante para calcular el coeficiente de reflexión y transmisión mostradas en las figuras.



**Figura 6.** Graficas de la función K

En la figura 6, se muestra el coeficiente de reflexión usando la formula (11), y por medio de la formula  $T = 1 - R$  encontraremos el coeficiente de transmisión para un dipolo con una longitud de 0.8 m, y la resonancia se encuentra a la mitad que es de 0.45mm con un filtro rechazo de banda.



**Figura 7.** Grafica del coeficiente de transmisión y reflexión

### 3.1.2 El método del potencial vectorial de Hertz

El primer paso para realizar el proyecto del esparcimiento electromagnético para SSF es relacionar el campo esparcido de las SSF con la corriente inducida de la superficie sobre el filtro del campo incidente. Para realizar la formulación de las SSF asumiremos que es infinitesimalmente delgada, la cual es valida para la mayoría de las aplicaciones incluso para frecuencias ópticas. Para el caso de que la geometría se auto ajuste es considerado

como un conductor magnético perfecto de una SSF. Mas adelante se indicara como manipular o modificar las formulas sobre un substrato o conductor dieléctrico.  $J$  es la densidad de corriente inducida en la SSF, y  $A$  es el potencial magnético del vector debido a la corriente. La corriente inducida  $J$  de la superficie las componentes no equivalen a cero, asumiendo que el tiempo de conversión es  $\exp^{j\omega t}$  uno puede hacer la transpuesta de  $(z)$  los componentes de  $A$  y  $J$  son los siguientes:

$$\begin{bmatrix} Ax(x, y) \\ Ay(x, y) \end{bmatrix} = \bar{G}(x, y) * \begin{bmatrix} Jx(x, y) \\ Jy(x, y) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\text{Donde } \bar{G} = \frac{\exp(-jk_0 r)}{4\pi r} \bar{I}, r = (x^2 + y^2)^{1/2}$$

$k_0$  = Número de ondas en el espacio libre

$\bar{I}$  = Identidad del tensor y, \* es la convolución

El siguiente paso es expresar la transversal del esparcimiento del campo eléctrico  $E^s$  en el plano del filtro,  $z = 0$ , los términos de los componentes transversales del potencial del vector  $A$  es obtenida por:

$$\begin{bmatrix} E_x^s \\ E_y^s \end{bmatrix} = \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \begin{bmatrix} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + k_0 & \frac{\partial^2}{\partial x\partial y} \\ \frac{\partial^2}{\partial x\partial y} & \frac{\partial^2}{\partial y^2} + k_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ax \\ Ay \end{bmatrix} \quad (12)$$



Una de las máximas ventajas de la periodicidad de las frecuencias reciprocas de la geometría se encuentra en el dominio del espectro y para describir la ecuación anterior se utiliza la transformada de furrier en (13) para obtener.

$$\begin{bmatrix} \bar{E}_x^s(\alpha, \beta) \\ \bar{E}_y^s(\alpha, \beta) \end{bmatrix} = \frac{1}{jw\epsilon_0} \begin{bmatrix} k_0 - \alpha^2 - \alpha\beta & \\ -\alpha\beta & k_0 - \alpha^2 \end{bmatrix} \bar{G}(\alpha, \beta) \begin{bmatrix} \bar{J}_x(\alpha, \beta) \\ \bar{J}_y(\alpha, \beta) \end{bmatrix} \quad (13)$$

Donde  $\bar{G}(\alpha, \beta) = \frac{-j}{2(k_0^2 - \alpha^2 - \beta^2)^{1/2}} \bar{I}$

y ,  $\alpha$  y  $\beta$  son variables que corresponden a las coordenadas  $x$  y  $y$ . Cuando la periodicidad de la SSF es doble en la transformada de furrier la corriente inducida  $J$  no es cero, para las evaluaciones de las variables discretas espectrales  $\alpha_{mn}$  y  $\beta_{mn}$  se asocian con la armónica de Floquet para la frecuencia armónica doble denominada por el matemático francés Floquet que introdujo el concepto de armónico de la solución de las ecuaciones diferenciales.

El **teorema de Floquet** se obtiene de una variable compleja o real continuo definida por todos los valores de la variable real  $X$  y esta es periódica con un mínimo de  $\pi$  tal que

$$Q(x + \pi) = Q(x) \quad (14)$$

entonces la ecuación diferencial

$$y'' + Q(x)y = 0 \quad (15)$$

tiene dos soluciones diferenciales continuas  $y_1(x)$  y  $y_2(x)$  y la ecuación característica es:

$$p^2 - [y_1(\pi) + y_2'(\pi)]p + 1 = 0 \quad (16)$$

con los eigenvalores  $p_1 = e^{i\pi}$  y  $p_2 = e^{-i\pi}$  el estado del teorema de Floquet's son las raíces  $p_1$  y  $p_2$  son diferentes una de la otra, () tiene dos soluciones lineales independientes

$$F_1(x) = e^{i\pi} p_1(x) \quad (17)$$

$$F_2(x) = e^{-i\pi} p_2(x) \quad (18)$$

Las expresiones explicitas de  $\alpha_{mn}$  y  $\beta_{mn}$  son las siguientes:

$$\alpha_{mn} = \frac{2\pi m}{a} + k_0 \sin \theta \cos \phi \quad \beta_{mn} = \frac{2\pi n}{b \sin \Omega} - \frac{2\pi m}{a} \cot \Omega + k_0 \sin \theta \sin \phi \quad (19)$$

Donde  $\phi$  y  $\theta$  son los ángulos de la onda plana incidente

Tomando la transformada inversa se implementan las condiciones de frontera en el campo eléctrico total que es la suma del campo esparcido y el campo incidente que es cero sobre la superficie donde se encuentra el conductor perfecto que se encuentra la incógnita de la siguiente ecuación de la corriente inducida sobre el filtro.

$$\frac{1}{j\omega \epsilon_0} \sum_m \sum_n \begin{bmatrix} k_0^2 - \alpha_{mn}^2 & -\alpha_{mn} \beta_{mn} \\ -\alpha_{mn} \beta_{mn} & k_0^2 - \beta_{mn}^2 \end{bmatrix} \tilde{G}(\alpha_{mn}, \beta_{mn}) \begin{bmatrix} \tilde{J}_x(\alpha_{mn}, \beta_{mn}) \\ \tilde{J}_y(\alpha_{mn}, \beta_{mn}) \end{bmatrix} e^{j(\alpha_{mn}x + \beta_{mn}y)} \\ = \sum_m \sum_n \begin{bmatrix} \tilde{G}_{xx} & \tilde{G}_{xy} \\ \tilde{G}_{yx} & \tilde{G}_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{J}_x(\alpha_{mn}, \beta_{mn}) \\ \tilde{J}_y(\alpha_{mn}, \beta_{mn}) \end{bmatrix} e^{j(\alpha_{mn}x + \beta_{mn}y)} = \begin{bmatrix} E_x(x,y) \\ E_y(x,y) \end{bmatrix} \quad (20)$$

Las derivadas y la constante  $\frac{1}{j\omega\epsilon_0}$  son incorporadas a las componentes individuales para simplificar  $\bar{G}$ . En cuanto a la corriente inducida se resuelve con las ecuaciones anteriormente descrita, como el coeficiente de reflexión y transmisión por el dominio de armónicos, y para el filtro el campo esparcido.

Para una abertura (inducida) SSF. Se puede reemplazar los conceptos de dualidad reemplazando  $E$  con  $H$  y  $\epsilon_0$  con  $\mu_0$  y además se hace un llamado de los filtros geométricos, definiendo la corriente magnética  $k$  en términos de apertura del campo eléctrico.

$$k = E^a \times \hat{z} \quad (21)$$

Se obtiene la siguiente ecuación para la transpuesta de  $E^a$

$$\frac{2}{j\omega\epsilon_0} \sum_m \sum_n \begin{bmatrix} \alpha_{mn}\beta_{mn} & k_0^2 - \alpha_{mn}^2 \\ -k_0^2 + \beta_{mn}^2 & -\alpha_{mn}\beta_{mn} \end{bmatrix} \bar{G}(\alpha_{mn}, \beta_{mn}) \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} E_x^a(\alpha_{mn}, \beta_{mn}) \\ E_y^a(\alpha_{mn}, \beta_{mn}) \end{bmatrix} e^{j(\alpha_{mn}x + \beta_{mn}y)} = \begin{bmatrix} H_x^i \\ H_y^i \end{bmatrix}$$

La solución de la ecuación anterior la distribución de campos inducidos en la apertura de SSF es directamente para conductores perfectos, si los filtros tienen una conductividad finita se debe de determinar el problema de corrientes sobre los campos [19].

Hay que considerar los casos anteriores para las aberturas o parches de SSF que son:

- Incrustado en un medio dieléctrico de un grosor infinito
- Impresos en sustratos
- Impresos en súper sustratos

### 3.2 Aplicaciones de SFSF

Ciertos fenómenos naturales exhiben distintas características que pueden asociarse con conceptos de fractales, y su estudio ha sido de gran interés para científicos en muchos campos. En la región del infrarrojo lejano son usadas como un divisor de haz para dividir dos frecuencias [24] .

Otra de las aplicaciones de las SSF es que pueden protegerte de la radiación, que pueden ser generadas por celulares, frecuencias de radios, las ondas infrarrojas la luz visible luz UV y microondas, absorbiendo las ondas electromagnéticas ya que estas son un riesgo potencial para el cuerpo del ser humano [19].

En el infrarrojo cercano y porciones visibles del espectro, los filtros se han propuesto para frecuencias selectivas solares para ayudar en la recolección de la energía solar: un filtro puede ser diseñado para bandas de frecuencia donde las celdas solares sean mas eficientes y las frecuencias reflejadas estén fuera de las celdas [19].

Con el avance de los sistemas de comunicaciones y el importante incremento de otras aplicaciones de los sistemas inalámbricos, las antenas de banda ancha y de bajo contorno están en gran demanda tanto para aplicaciones comerciales como militares. Antenas multi-banda y banda ancha son las más aceptadas en los sistemas de comunicación personal (celulares, beepers, etc.), pequeñas terminales satelitales y otras aplicaciones inalámbricas.

## Capítulo 4

En este capítulo se discuten las generalidades de la herramienta de programación para la simulación y evaluación de las SFSF propuestas en esta tesis.

### FEMLAB.

FEMLAB es un software interactivo para modelar y simular problemas científicos, basados en las ecuaciones diferenciadas parciales (PDEs) que son la base fundamental para las leyes de la ciencia. Con las características de multi-física FEMLAB, puede modelarse de dos maneras las simulaciones. La primera es crear la figura definiendo las cantidades físicas que se aplique al modelo. El segundo es usando solo el modelado de las ecuaciones diferenciales parciales [26].

FEMLAB ofrece las herramientas para modelar los fenómenos físicos como son, generación de acoplamiento automático, la ecuación solucionada, la visualización y el proceso de cómo se puede desempeñar en el medio ambiente. Con el interfaz de MATLAB, FEMLAB tiene un gran alcance para su programación. Es fácil de utilizar el interfaz gráfico y la programación de FEMLAB hace que la simulación sea fácil de comprender.

<i>Ley de Gauss</i>	$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$
<i>Ley de Faraday</i>	$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$
<i>Ley de Gauss para el campo magnetico</i>	$\nabla \cdot \vec{E} = 0$
<i>Ley de Ampere—Maxwell</i>	$\nabla \times \vec{B} = \mu_h \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$

Figura 8. Ecuaciones de Maxwell

Donde  $\rho$  y  $J$  son la carga y la densidad de corriente totales, además es importante saber que:

$$C = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (23)$$

El modulo que se escogió en FEMLAB para trabajar, es el de electromagnetismo con las necesidades especificadas, esencialmente para el ingeniero eléctrico y electrónico. Esto se aplica en la ultima tecnología de la multi fisica, que se modela en electromagnetismo. El módulo contiene las formulas para modelar estática y radiofrecuencia en la microonda. Algunos ejemplos son imanes, condensadores, motores eléctricos, antenas, dispositivos fotónicos y guías de onda que es el método que se utilizo para simular las SFSF.

La aplicación se basa de las ecuaciones del Maxwell mencionados en el tema anterior según lo estudiado en libros de electromagnéticos. El ingeniero sea practicante o estudiante, reconocerá los conceptos que hemos elegido. Además de los usos que cubren los campos y ondas electromagnéticos, también le da la libertad para cambiar las aplicaciones, como son las estructuras y fluidos [26].

Todas las aplicaciones de cómputo tienen parámetros tales como resistencia, capacitancia, inductancia y el uso de modelar circuitos. En fin este módulo electromagnético trabaja en campos electromagnéticos y ondas electromagnéticas.

Tiene solución simultánea de números lineales, no lineales y en el dominio del tiempo de las PDEs. Con un graficado interactivo, de uso fácil para modelar en el campo electromagnético.

Usos predefinidos para el electromagnetismo y la propagación de la onda, incluyendo el análisis de mapeo (*MESH*).

Una biblioteca extensa que demuestra y documenta los ejemplos solucionados para la propagación de la onda y del campo electromagnético. Documentación y notación en el campo electromagnético. La construcción del elemento para la propagación de la onda en 3D.

El módulo electromagnético se utiliza para el diseño virtual de las áreas donde los ingenieros necesitan simulaciones de campo electromagnético, incluye componentes del sistema de energía, sistemas micro electromecánicos (*MEMS*), antenas, guías de onda y los resonadores en la ingeniería de la microonda, fibras ópticas, guías de onda, cristales fónicas y dispositivos semiconductores.

El módulo de Electromagnetismo proporcionado por el programa tiene las siguientes formulas para resolver los problemas:

- Electrostática
- Magnetostática
- Electromagnetismo de baja frecuencia
- Propagación de la onda plana
- Propagación de la onda simétrica

- Propagación de la onda del vector en 3D
- Análisis completo del modo del vector en 2D y 3D

Las características de los materiales permiten las simulaciones de ondas-armónicas. Las capacidades físicas de los módulos permiten acoplar las simulaciones electromagnéticas con transferencia de calor, mecánicos estructurales y flujo del líquido, esto implementación ejecuta las ecuaciones diferenciales parciales (PDEs) con aplicaciones genéricas en FEMLAB [10].

Las interfaces de la propagación de la onda permiten modelar materiales homogéneos. También hay que especificar la constante dieléctrica o el índice de refracción, con valores simples o complejos.

El módulo realiza simulaciones usando la onda de propagación en tiempo armónico. En planos TE (transversal eléctrico) y onda TM polarizada.

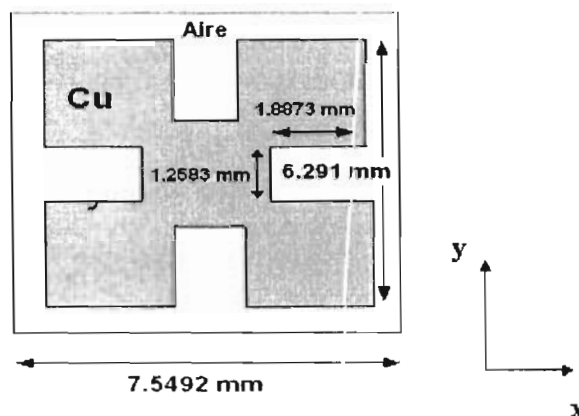
## **4.1 Tutorial para resolver problemas electromagnéticos**

El método que se utilizó para simular en FEMLAB fue modelado en ondas electromagnéticas y su aplicación es el de una onda armónica, de las ecuaciones de Maxwell (nota son descritas en vectores fasoriales representadas con símbolos  $E=(0,1,0)$ )



donde  $E(t) = \text{Real}E \cdot e^{j\omega t}$  son importantes por que cualquier función puede ser representada como la suma de senos y cósenos.

Se llevo a cabo la implementación en FEMLAB para analizar las características de transmisión de arreglos periódicos de SFSF en función de la frecuencia. En este estudio cualquier interacción entre los elementos no es tomada en cuenta por lo tanto las características de transmisión pueden ser obtenidas analizando solo una SFSF metálica (Figura 14)

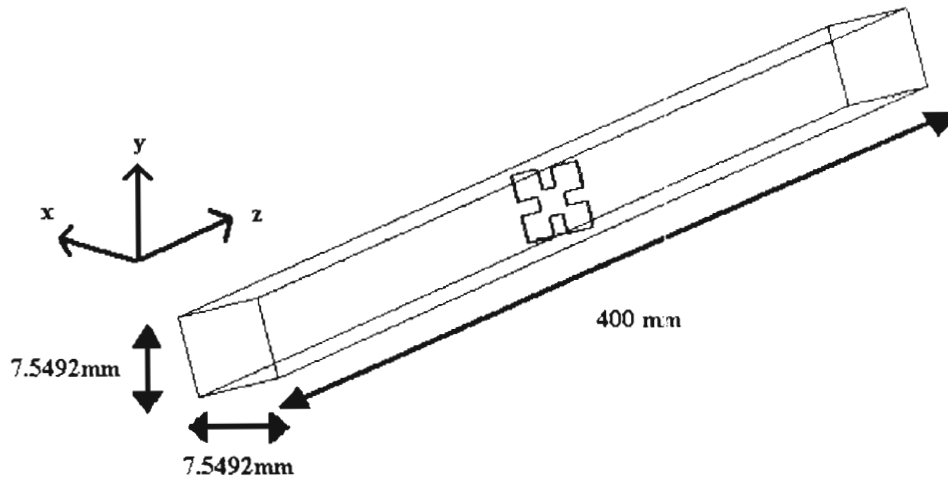


**Figura 9.** Diagrama esquemático de una célula de la simulación

La figura 9 muestra la simulación de la célula del arreglo simulado de una SFSF de cobre en aire. Para obtener las características de transmisión del arreglo de SFSF metálicas en una onda plana que es polarizada paralelamente al eje  $Y$  y se lanza en dirección  $Z$  (figura 10).

La onda plana incidente es de magnitud unitaria (Eq. (24)), por lo tanto las características de la transmisión se obtienen analizando la onda transmitida, que es después de que el campo eléctrico golpee a la superficie metálica.

$$\vec{E}(z,t) = \cos(kz - \omega t)\vec{u}_z \quad (24)$$

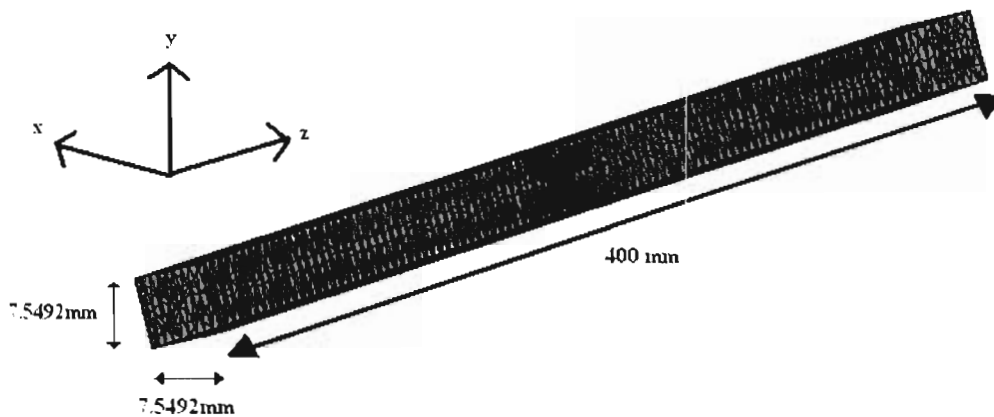


**Figura 10.** Espacio de simulación analizando un arreglo de SFSF metálicas.

Para estas simulaciones como ya se ha mencionado del arreglo de la estructura se toma un elemento, que se encuentra en el medio ambiente (aire) esta en el infinito y para las simulaciones las condiciones de frontera se colocan en un espacio finito. En el plano YZ se utiliza PMC (Conductor Magnético Perfecto), esto equivale a decir que  $n \times H = 0$  y significa que el campo magnético de estos planos es cero. En el plano ZX se utiliza PEC (Conductor eléctrico Perfecto), y equivale a decir  $n \times E = 0$  y por lo tanto el campo eléctrico de la superficie es cero. Las ecuaciones de Maxwell lo requieren y se colocan las propiedades del dieléctrico que en este caso es el aire con  $\epsilon_r = \mu_r = 1$  y  $\sigma = 0$ . Para el elemento del arreglo se asume que el metal es un conductor eléctrico, el metal es de cobre con una conductividad de  $10^7$ . Para los parámetros del malleo son aproximadamente de

17000 elementos. Después se desliza el campo eléctrico por todo el espacio donde pasa por el metal dejando pasar ciertas frecuencias [27].

Se genera la estructura de las Superficies Fractales Selectivas a la Frecuencia en los cuales pueden ser modificadas las dimensiones. Se crean los elementos de borde (propriadamente la discretización), mediante el comando llamado mesh (figura 11).



**Figura 11.** Espacio de simulación analizando un arreglo de SFSF metálicas usando la discretización .

resuelven las ecuaciones por el Método del elemento finito. Se produce una onda electromagnética que pasa a través de la superficie. La densidad de potencia  $S$  esto dado por el vector de Poynting que es el producto cruz de los vectores del campo del eléctrico  $E$  y del campo magnético  $H$ . el voltaje  $V = E_y H$  y la corriente  $I = H_z W$ . Por analogía la potencia transmitida en los circuitos está dada por:

$$P = VI = E_y H_z HW = E_y H_z A \quad (25)$$

donde  $HW$  = el área del ajuste de células del campo la densidad de energía:

$$S = \frac{P}{A} = E_y H_z \quad (26)$$

El flujo de energía es perpendicular a E y H, puede ser demostrado que en la anotación vectorial la energía transmitida esto dado cerca [25].

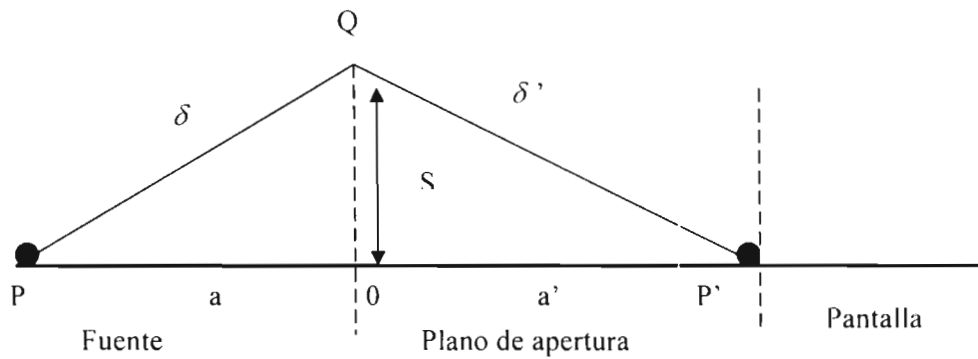
$$S = E \times H \quad \text{Vector de Poynting} \quad (27)$$

Una de las características para graficar la SFSF es por medio de un barrido de frecuencia para encontrar las resonancias de la superficie, el filtro permite el paso o rechazo de cierto grupo de frecuencias (banda de frecuencia). La siguiente formula se utiliza para cambiar a decibeles el coeficiente de transmisión de la superficie:

$$-dB = 10 \text{Log} \frac{PT}{PI} \quad (\text{Potencia}) \quad (28)$$

#### 4.1.1 Lentes de Fresnel

En la óptica las estructuras fractales de algunos ondas de campos ópticos y los patrones de difracción generados por varias aperturas fractales concretamente para anillos de una misma área. La difracción de Fresnel se da cuando la apertura no esta iluminada con luz colimada ó la pantalla esta cerca de la apertura (en relación con el tamaño de la apertura) el campo eléctrico es cercano, el efecto de la difracción existe entre un borde.



**Figura 12.** La difracción debido a un solo borde es simple difracción de Fresnel.

La distancia que recorre la luz de  $P$  a  $P'$  pasando por el punto de la apertura ( $Q$ ) esta dada por:

$$\text{Distancia} = \overline{PQ} + \overline{QP'} \quad (29)$$

$$(a + \delta) + (\delta' + a')$$

La luz viaja de  $P$  a  $P'$  por difracción. La diferencia de camino óptico de la luz al viajar de  $PP'$ , pasando por  $q$  y por  $\theta$ .

$$\overline{PQ} = a + \delta \quad ; \quad \overline{PQ} = a \quad ; \quad \overline{QP'} = \delta' + a' \quad ; \quad \overline{OP'} = a' \quad (30)$$

$$\text{como } a^2 + s^2 = (a + \delta)^2 \quad \text{y} \quad a'^2 + s^2 = (a' + \delta')^2 \quad (31)$$

$$a^2 + s^2 = a^2 + 2a\delta + \delta^2 \quad \text{y} \quad a'^2 + s^2 = a'^2 + 2a'\delta + \delta'^2 \quad (32)$$

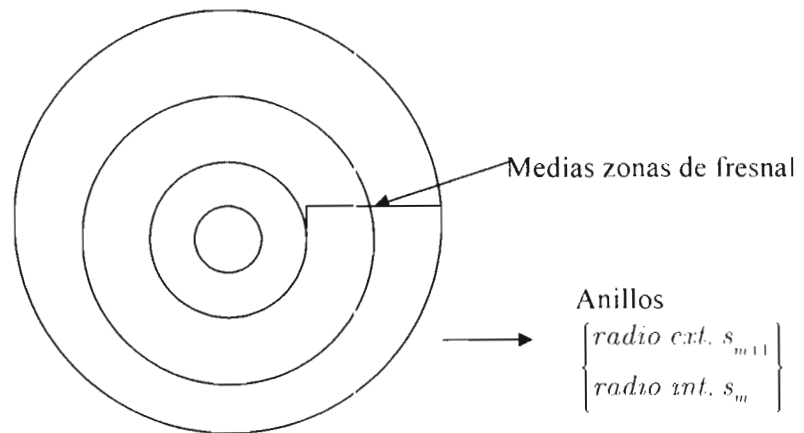
Si suponemos que  $s \ll a, a' \ll \delta$  tambien es muy pequeño

$$\therefore \delta = \frac{s^2}{2a} \quad \delta' \approx \frac{s^2}{2a'} \quad (33)$$

por lo tanto la diferencia de camino óptico entre  $\overline{POP'}$  y  $\overline{PQP'}$  va a estar dada por:

$$OPD = \delta + \delta' \cong \frac{s^2}{2a} + \frac{s^2}{2a'} \begin{cases} m\lambda \rightarrow \text{Interferencia constructiva} \\ (m + 1/2)\lambda \rightarrow \text{Interferencia destructiva} \end{cases}$$

Podemos definir regiones con radios  $s_1, s_2, s_3, \dots, s_N$  tal que  $OPD_1 = \lambda/2, OPD_2 = 2\lambda/2, OPD_3 = 3\lambda/2, \dots, OPD_M = M\lambda/2$ . A estas zonas se les conoce como **zonas de fresnel**. Dos radios consecutivos de las zonas de fresnel están desfasadas  $\pi$  radios uno del otro [25].



**Figura 13.** Radio de Fresnel depende de la raíz cuadrada de enteros

Para encontrar los radios de fresnel se necesita la siguiente formula:

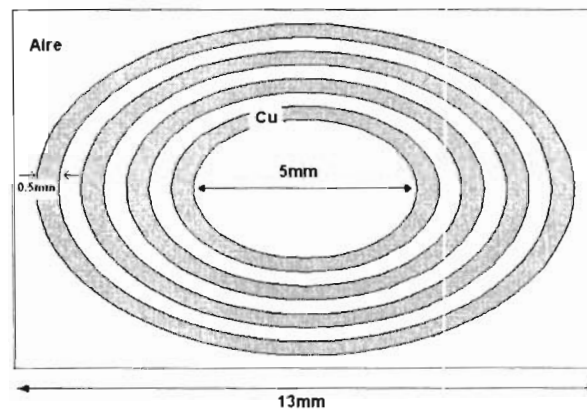
$$\frac{S^2 m}{2} \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{a'} \right) = m \frac{\lambda}{2} \quad (34)$$

$$\therefore Sm = \sqrt{\lambda} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} Am &= \pi s^2 m - \pi s^2 m - 1 = \pi \left( m\lambda \frac{a'a}{a+a'} - (m-1)\lambda \frac{a'a}{a+a'} \right) \\ &= \pi\lambda \frac{a'a}{a+a'} \end{aligned} \quad (36)$$

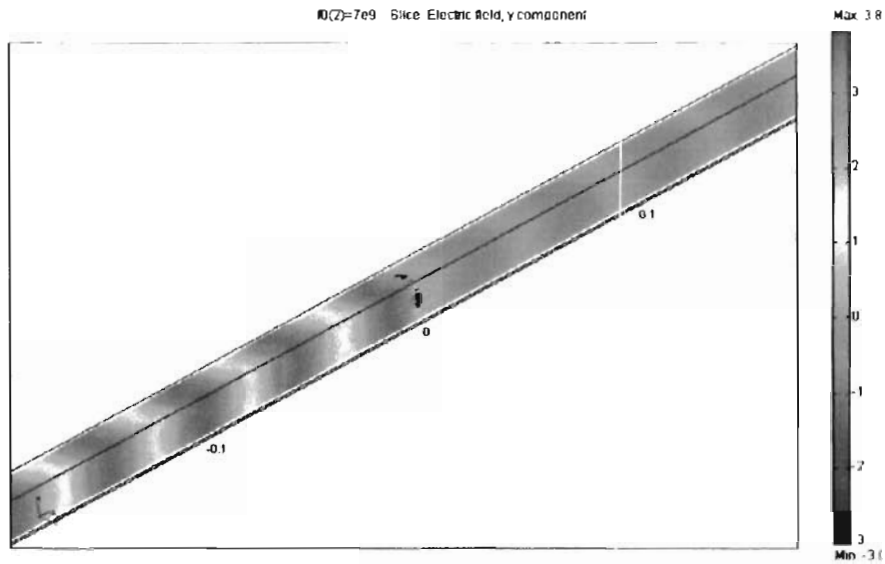
$$\therefore Am = \pi\lambda \frac{a'a}{a+a'} \quad (37)$$

Todos los anillos tienen la misma área que solo depende de  $\lambda$  y de la distancia a la fuente de la pantalla.



**Figura 14.** anillos de Fresnel

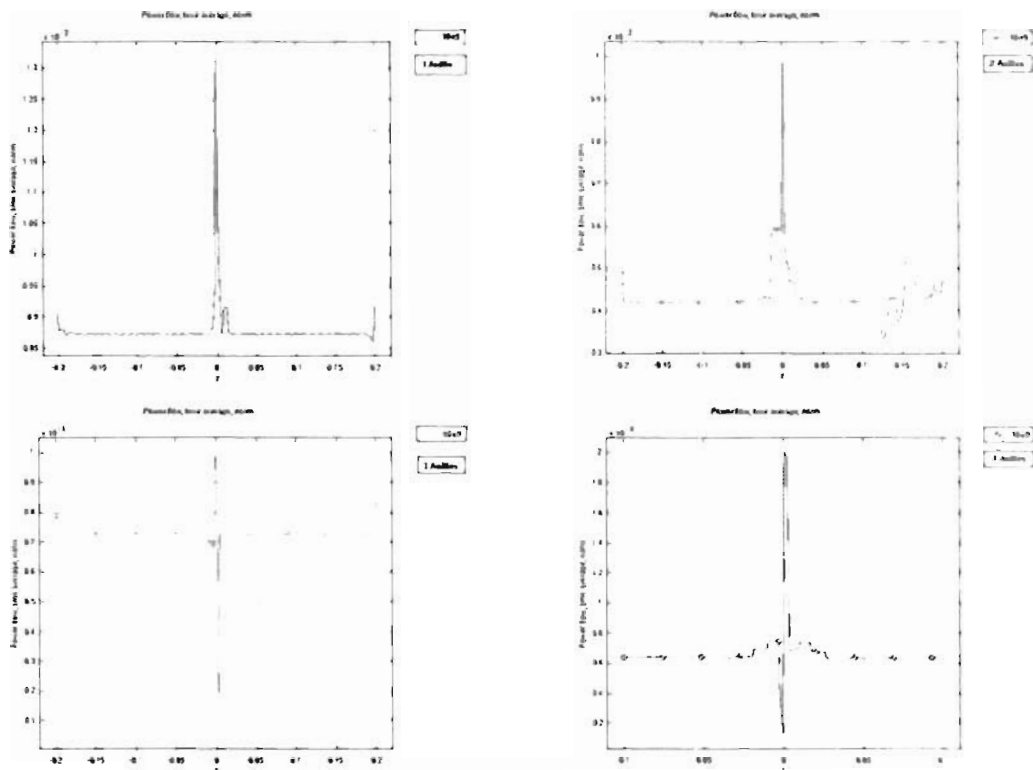
En la figura 15 es el campo eléctrico de 7 Giga Hertz que conforme se iba aumentando la frecuencia se iba distorsionando el flujo de potencia aproximadamente a los 15 Giga hertz.



**Figura 15.** Simulación de una frecuencia de 7 Giga Hertz.

En la figura 16 se muestra como pasa una frecuencia de 10 Giga Hertz, sobre diferentes anillos que varían de 1 a 4, todos los anillos tienen la misma área y solo dependen de la frecuencia que atraviesa la superficie, a una distancia de 200 mm donde se incide el campo eléctrico, cuando solo un anillo la potencia es mas grande y va disminuyendo conforme aumentan los anillos.





**Figura 16.** Difracción a una frecuencia de 10 Giga Hertz

## Capítulo 5

### SIMULACIONES.

FEMLAB simula fenómenos físicos en un ambiente totalmente gráfico por medio de la solución de ecuaciones diferenciales por el Método del Elemento Finito.

El programa nos permite simular un elemento del arreglo periódico, por el cual la onda se propaga en dirección Z y se polariza en Y de ahí se hace un barrido de frecuencia y se pueden ver las resonancias de las superficies fractales selectivas a la frecuencia.

#### 5.1 Dipolo

La resonancia, de la longitud de onda para un arreglo de dipolos metálicos es obtenida teóricamente por:

$$\lambda_r = 2 \cdot L, \quad (38)$$

donde L es la longitud efectiva del dipolo la cual en el espacio libre es igual a su longitud física [9]. La frecuencia de resonancia puede ser obtenida de la longitud de onda resonante dividiendo la velocidad de la luz por la longitud de onda, por lo tanto la Ec. (39) se convierte:

$$f_r = \frac{c}{2 \cdot L}, \quad (39)$$

La tabla 2 muestra las frecuencias de resonancia y longitudes de onda resonantes en función de la longitud del dipolo, los resultados obtenidos a través de la simulación se examinan los resultados predichos por las ecuaciones (38) y (39).

Longitud del dipolo (mm)	Frecuencia de resonancia (GHz)	Longitud de onda resonante (mm)
13.25	11.30	26.54
12.25	12.24	24.50
11.25	13.33	22.50
10.25	14.63	20.50
9.25	16.21	18.50
8.25	18.18	16.50

Tabla. 2. Frecuencia de resonancia y longitud de onda resonante en función de la longitud del dipolo.

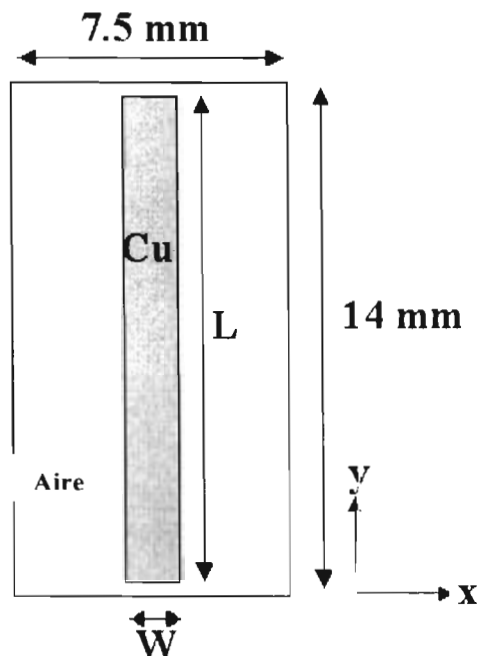
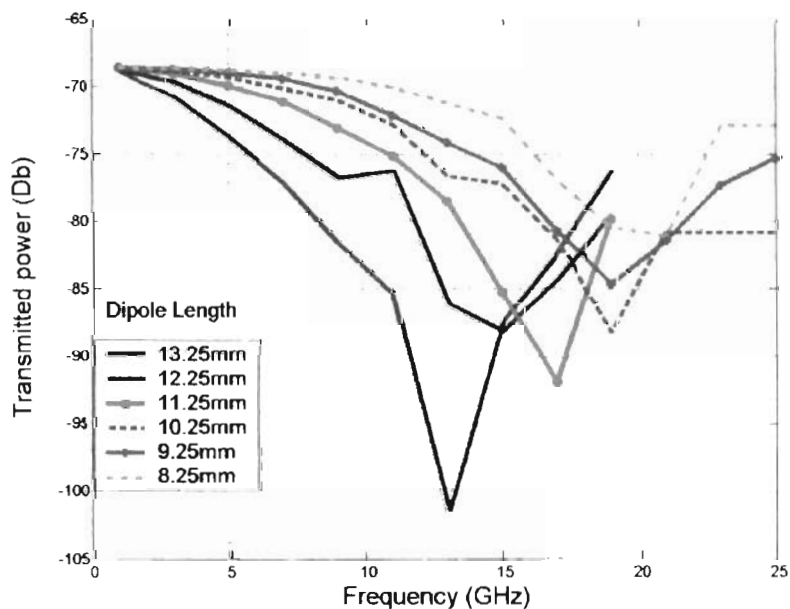


Figura 17. Dipolo la rejilla genera un filtro rechazo de banda

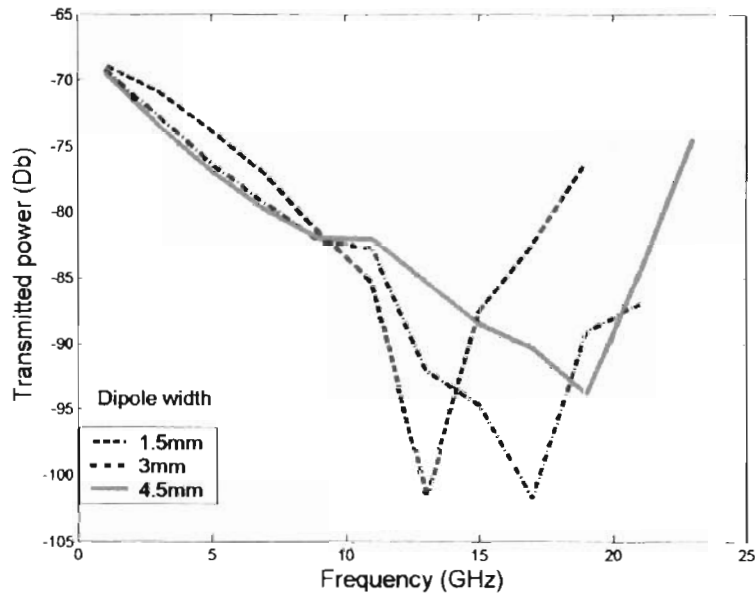
En la figura 18 muestra un estudio parametrico donde las características de la transmisión de los dipolo de cobre en aire son analizadas en función de la frecuencia para distintas longitudes del dipolo, con un ancho constante en el dipolo de 1.5 mm. Como se puede ver en la figura 18 el arreglo de dipolos se comporta como un filtro rechazo de banda para una frecuencia de resonancia y esta frecuencia de resonancia aumenta cuando la longitud del dipolo va disminuyendo.



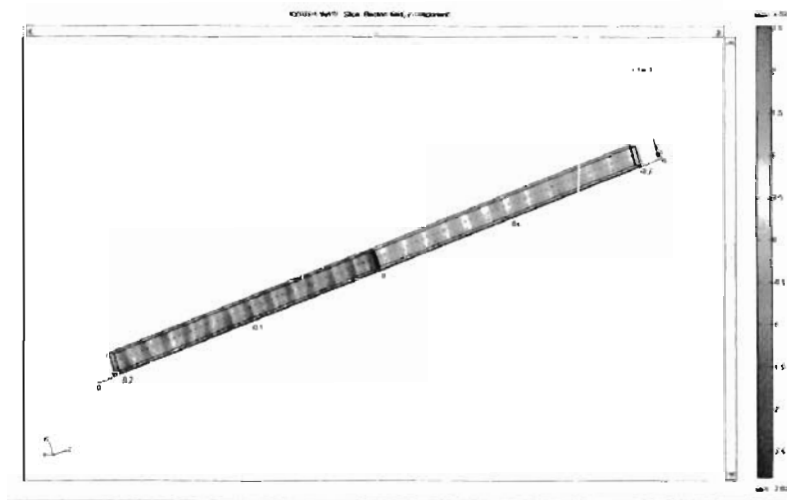
**Figura 18.** Frecuencias de resonancia usando el método del elemento finito cuando el dipolo cambia de ancho frecuencia contra Potencia

La figura 19 muestra las características de la transmisión de los dipolo de cobre en aire en función de la frecuencia para distintas anchuras del dipolo, con una longitud constante en el dipolo de 13.25 mm. Se puede ver también que el ancho del dipolo afecta la frecuencia de resonancia. Las ecuaciones (38) y (39) son validas para verificar la longitud de los dipolos , si el ancho del dipolo aumenta las ecuaciones (38) y (39) no son validas, en

la figura 18 se puede ver como la frecuencia de resonancia aumenta por el dipolo aumentando el ancho del dipolo.

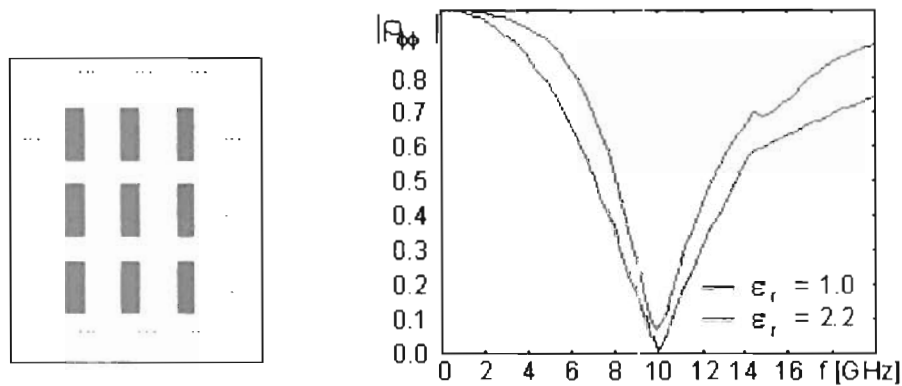


**Figura 19.** Frecuencias de resonancia usando el método del elemento finito cuando el dipolo cambia de longitud Frecuencia contra potencia



**Figura 20.** Simulación en FEMLAB de un dipolo de 13.25mm de longitud

Las superficies selectivas a la frecuencia sobre un arreglo de dipolos de 3 por 3 fue construida por un programa comercial basada sobre el elemento finito, solo es un elemento simple analizando su coeficiente de transmisión con dimensiones del dipolo de una longitud 13.25mm por un ancho 1.5mm sobre un substrato dieléctrico con una frecuencia de 10 GHz [28].



**Figura 21.** Grafica con la figura del Dipolo de la publicación análisis de superficies selectivas a la frecuencia.

La grafica de FEMLAB se han utilizado las mismas dimensiones con el método del elemento finito de la publicación con una frecuencia de resonancia aproximadamente de 13 GHz pero en lugar de que el dipolo tenga propiedades del vacío se utilizaron las del cobre y las graficas de la publicación solo se mostraron para ver el comportamiento del coeficiente de transmisión.

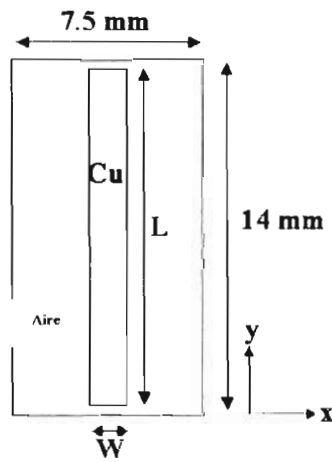
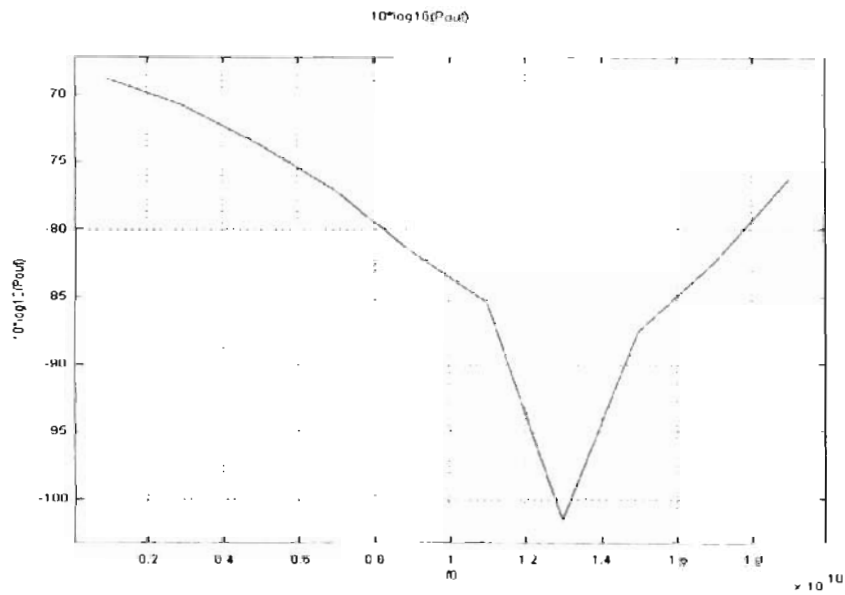
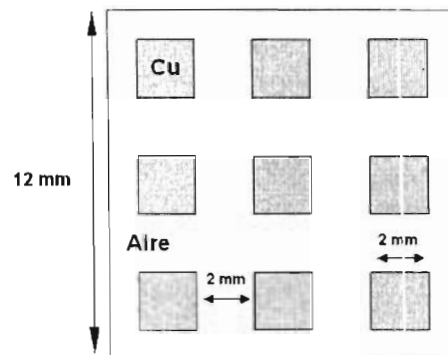


Figura 22. Grafica con la figura del Dipolo de la simulación en Femlab.

## 5.2 Arreglo de Cuadrados.

El diseño consiste de una pantalla de cuadrados que actúan como un filtro pasa altas y el material aparenta continuidad conductor eléctrico perfecto (PEC) a la longitud de onda. Los agujeros del arreglo generan un rechazo de banda de una SFSF. La geometría del sistema se diseño para una banda múltiple.

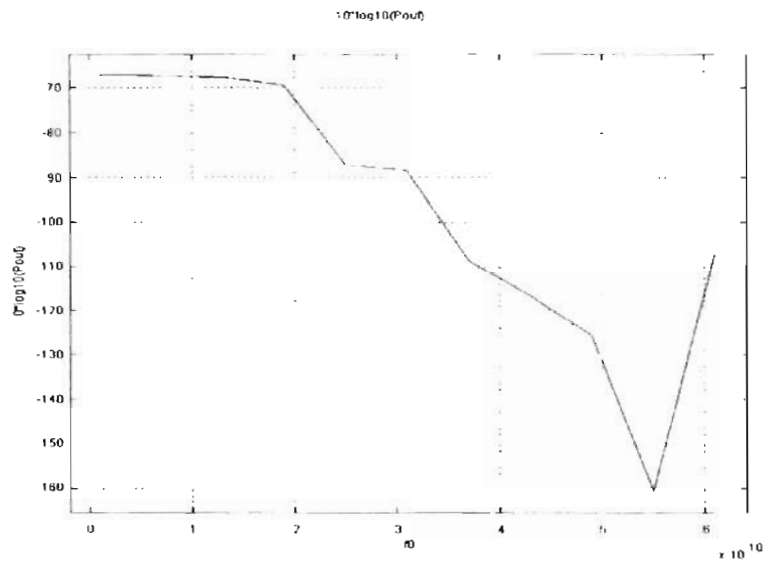
Una de las frecuencias de resonancia llega a los 10 G HZ y es la del cuadro de 2mm que seria su resonancia si la analizáramos por separado y la otra resonancia es de 60 G Hz que es el arreglo de 3 por 3 celdas de cobre. Los datos mostrados son usando el método del elemento finito. La frecuencia de resonancia esta dada por potencia transmitida en un espacio de 12mm. Las frecuencias de resonancia son para bandas de alta de frecuencia.



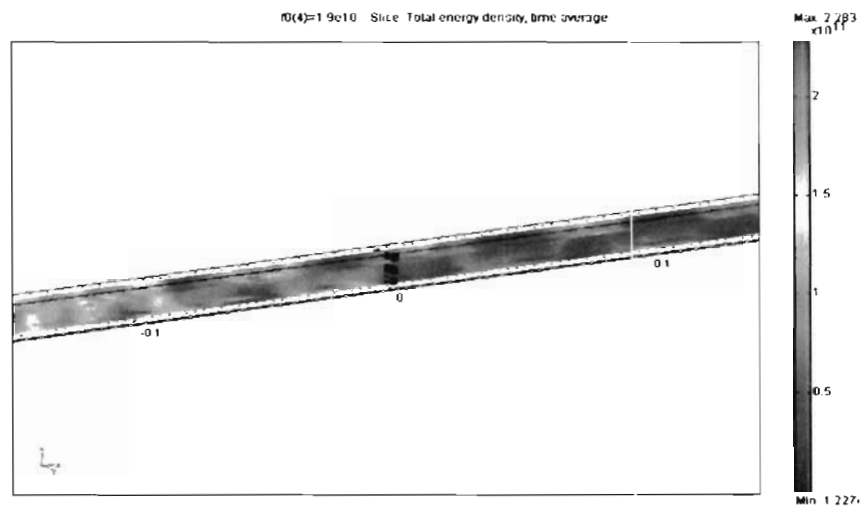
**Figura 23.** Elemento que genera un filtro rechazo de banda



La figura 24 muestra las características de la transmisión del arreglo de cuadrados en aire en función de la frecuencia, y en la figura 25 la guía de onda con un campo eléctrico con una frecuencia de 19 GHz.

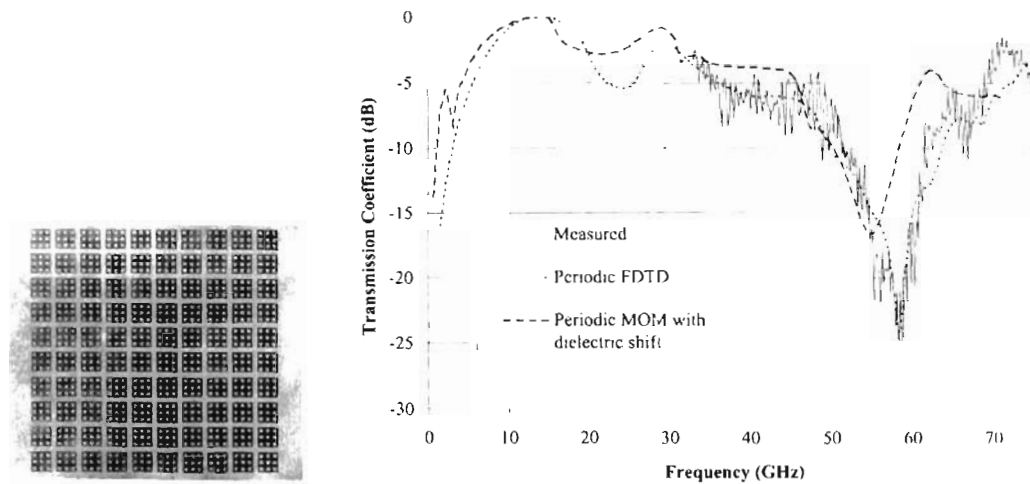


**Figura 24.** Frecuencia de resonancia usando el método del elemento finito



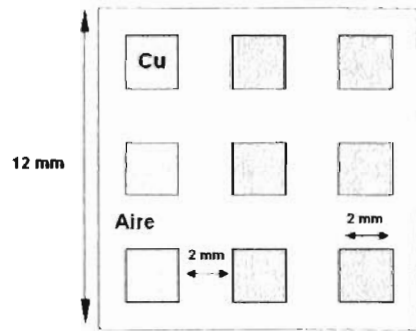
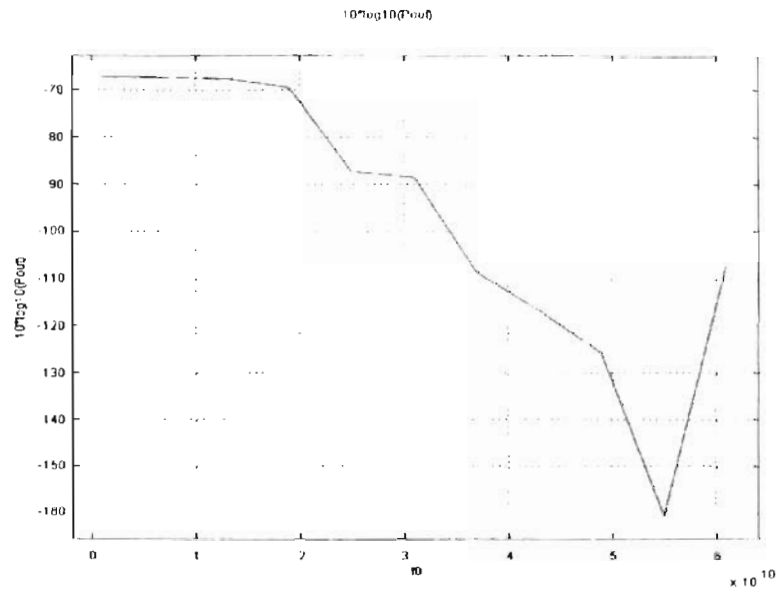
**Figura 25.** Simulación en FEMLAB campo eléctrico a una frecuencia de 19 Giga Hertz

Para esta simulación se uso el método de diferencias finitas en dominio del tiempo, en este diseño genera un rechazo de banda sobre el pasa banda que es generado por el cuadro más grande [30].



**Figura 26.** Grafica con la figura del Arreglo de cuadrados de la publicación Self-Similar Prefractal Frequency Selective Surfaces For Multiband and Dual polarized Applications.

Nuestro resultado en FEMLAB es parecido al de la publicación se tomaron las mismas medidas, el cuadro mayor de 12mm y los cuadros pequeños de 2mm y también tubo una frecuencia de resonancia aproximada de 60 G Hz.

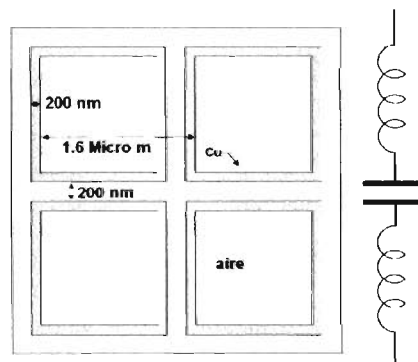


**Figura 27.** Grafica con la figura del Arreglo de cuadrados de la simulación en Femlab.

### 5.3 Circuito RLC.

Este elemento se ha utilizado para el diseño de la onda milimétrica y es capaz de diseñar superficies selectivas a la frecuencia, en las frecuencias altas, del infrarrojo. Para esta simulación se utilizó la potencia transmitida por longitud de onda, este diseño de cuadrados SSF es igual a un circuito análogo debido a que los lazos del metal inciden una radiación que excita una corriente sobre los alambres. Una resistencia se presenta porque la SSF se compone de pérdidas metálicas en el dieléctrico. Así, un circuito RLC puede ser vista como este tipo de geometría en la figura 20.

La superficie crea un filtro pasa banda con una frecuencia de resonancia de  $4.8\mu m$  como lo muestra la figura 29.

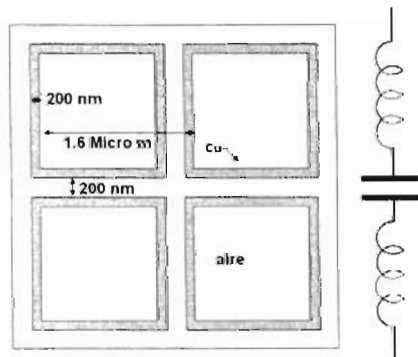


**Figura 28.** Elemento que genera un filtro pasa banda

### 5.3 Circuito RLC.

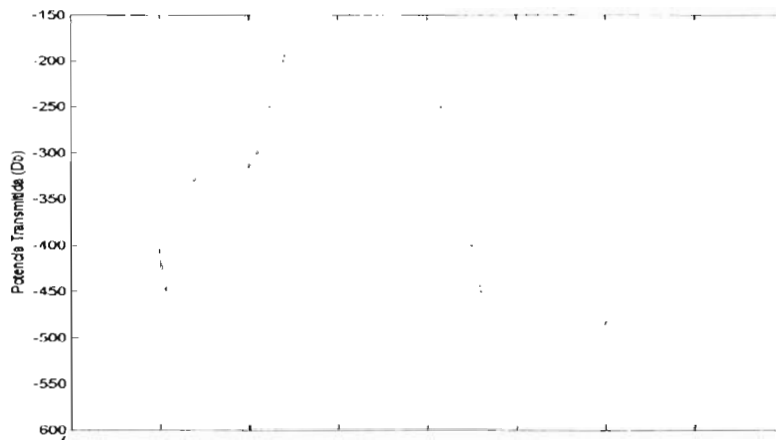
Este elemento se ha utilizado para el diseño de la onda milimétrica y es capaz de diseñar superficies selectivas a la frecuencia, en las frecuencias altas, del infrarrojo. Para esta simulación se utilizó la potencia transmitida por longitud de onda, este diseño de cuadrados SSF es igual a un circuito análogo debido a que los lazos del metal inciden una radiación que excita una corriente sobre los alambres. Una resistencia se presenta porque la SSF se compone de pérdidas metálicas en el dieléctrico. Así, un circuito RLC puede ser visto como este tipo de geometría en la figura 20.

La superficie crea un filtro pasa banda con una frecuencia de resonancia de  $4.8\mu\text{m}$  como lo muestra la figura 29.

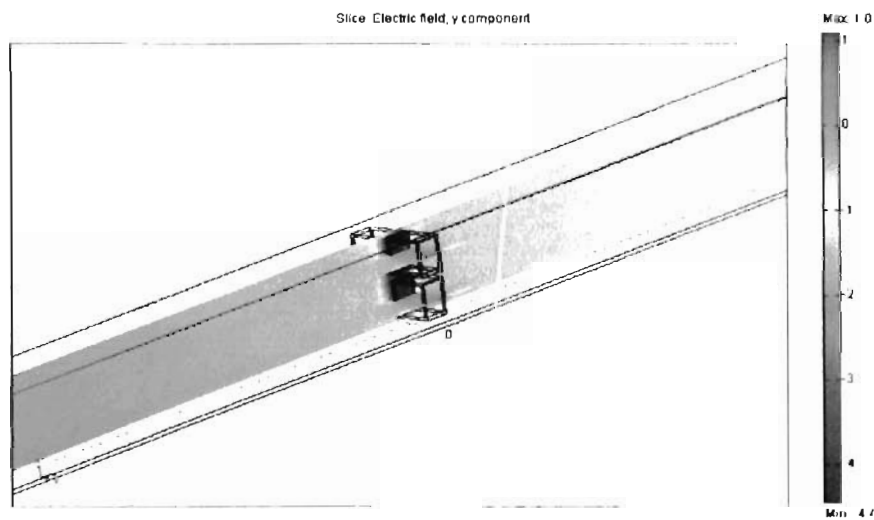


**Figura 28.** Elemento que genera un filtro pasa banda

La figura 29 muestra las características de la transmisión del circuito RLC en aire en función de la frecuencia, y en la figura 30 la guía de onda con un campo eléctrico con una frecuencia de 1 GHz.

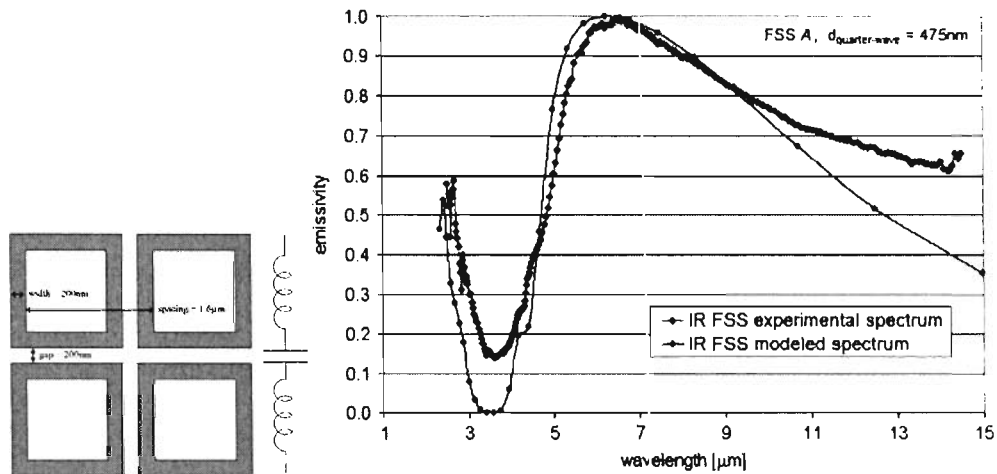


**Figura 29.** Longitud de onda resonante usando el método del elemento finito  
Frecuencia contra potencia transmitida en Db.



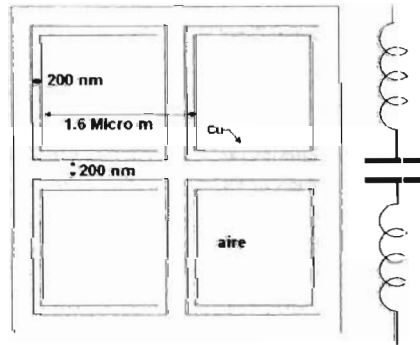
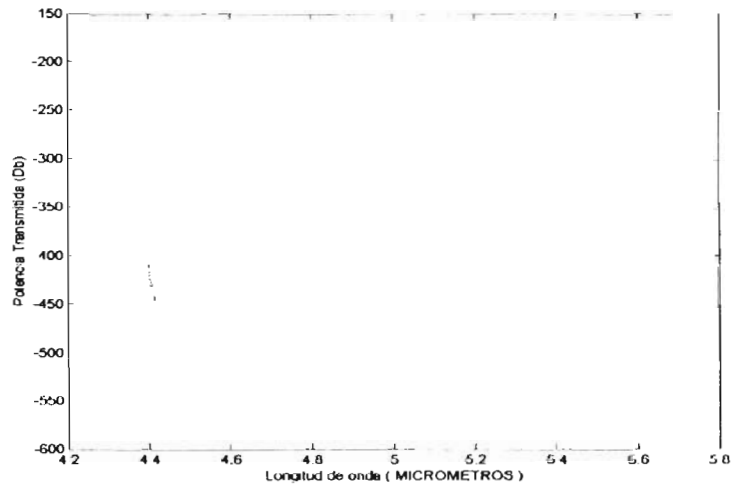
**Figura 30.** Simulación en FEMLAB campo eléctrico a una frecuencia de 1 Giga Hertz

Las estructuras de las SSF consiste de las siguientes capas: 150 nm de oro a tierra , una fina capa de silicio amorfo , modelada del cuadrado metálico. La oblea de silicio se utiliza puramente como estructura estable y rígida. La oblea en la tierra es baja eléctricamente y ópticamente inaplicable porque la radiación no pasará por el grosor de la tierra; la radiación infrarroja se atenúa perceptiblemente en 150 nm de oro. Esta capa se puede ver no solamente como tierra eléctrica, sino como un reflector que radie de nuevo radiación infrarroja que es incidente sobre él [29].



**Figura 31.** Grafica con la figura del circuito RLC de la publicación Infrared Frequency Selective Surface Based on Circuit-Analog Square Loop Design.

Para esta simulación se uso el método de diferencias finitas en dominio del tiempo, en este diseño genera un filtro pasa banda con una resonancia de 4.8 micrómetros, a esta simulación se comparo frecuencia contra longitud de onda.



**Figura 32.** Grafica con la figura del Circuito RLC de la simulación en Femlab.

La información para el circuito RLC se tomo de una publicación llamada Infrared Frequency Selective Surface Based on Circuit-Analog Square Loop Design y se utilizaron, el método de diferencias finitas en dominio del tiempo y con método periódico de momentos.



## 5.4 Fractal de Minkowski.

Un prefractal es el resultado de una superficie si el proceso iterativo se trunca después de un número finito de tiempo.

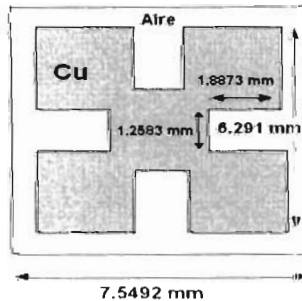
Para el diseño de este elemento de una SSF se crea el fractal de Minkowski, que da lugar a una resonancia múltiple debido al número de las iteraciones usadas para generar el elemento del prefractal. Cada iteración corresponde a una banda de parada en la respuesta de frecuencia referente a los cuadrados resonantes. Debe también ser observado que el espaciamiento entre los elementos, produce una escala en cada iteración. Sin embargo, solamente la figura de Minkowski comienza la primera iteración y tienen una periodicidad uniforme entre las células de la unidad. Después la segunda iteración, es el resultado de los cuadrados resonantes y entre los períodos comienza a variar la frecuencia, puesto que el espaciamiento entre los cuadrados es dictado por la geometría que requiere de cinco transformaciones y se pueden expresar de la siguiente manera.

$$\begin{aligned}m_1(x, y) &= \frac{2}{5}(x, y) \\m_{2,3,4,5} &= \frac{2}{5}\left(x \pm \frac{3}{10}, y \pm \frac{3}{10}\right) \\M_{s+1} &= m_1(M_s)Um_2(M_s)Um_3(M_s) \\&\quad Um_4(M_s)Um_5(M_s)\end{aligned}\tag{40}$$

donde,  $M_{s+1}$  es el resultado de los puntos del sistema, y  $s + 1$  esta compuesta por la iteración de la unión de los sistemas de doce transformaciones de que  $m_1$  pasa a través de  $m_5$ .

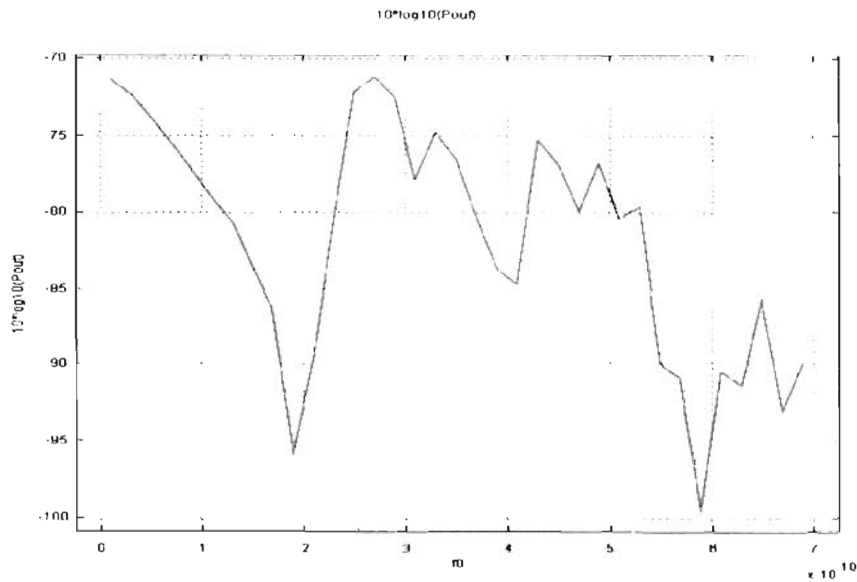
Cada iteración del fractal se estudia para demostrar el concepto. Este elemento prefractal se demuestra en Figura 23. La estructura muestra dos bandas distintas de su respuesta de transmisión. La primera banda de parada corresponde al cuadrado más grande que es la figura formada por el fractal de Minkowski y no hace caso a los cuadros pequeños. La segunda banda de la parada corresponde con los cuadrados más pequeños que se encajan dentro de la figura de Minkowski.

Las dos bandas de parada están cerca de 19 y 43 giga hertz. Esta discrepancia se pueden atribuir a la semejanza en la geometría que es construida por cuadrados. Los cuadrados más pequeños son similares a los cuadrados más grandes como lo muestra la figura 34, sin embargo, sus conexiones eléctricas son diferentes.

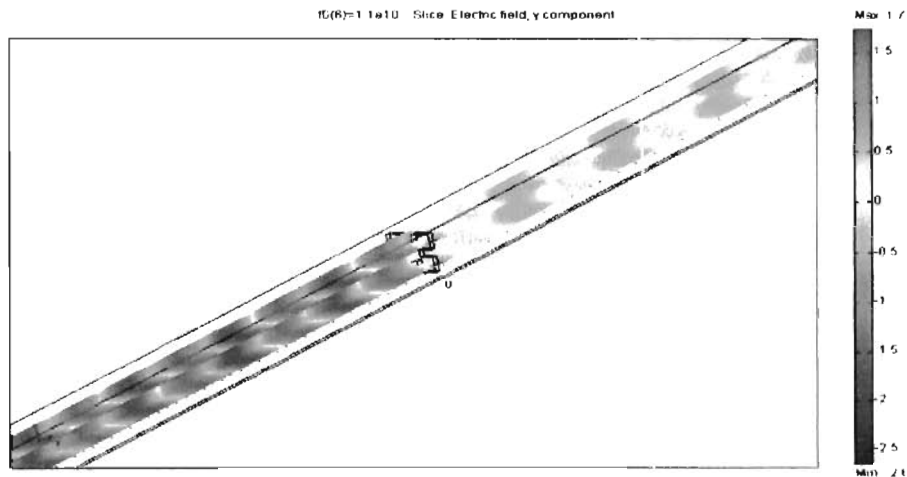


**Figura 33.** Fractal de Minkowski genera dos rechazos de banda

La figura 34 muestra las características de la transmisión del Fractal de Minkowski en aire en función de la frecuencia, y en la figura 35 la guía de onda con un campo eléctrico con una frecuencia de 11 GHz.



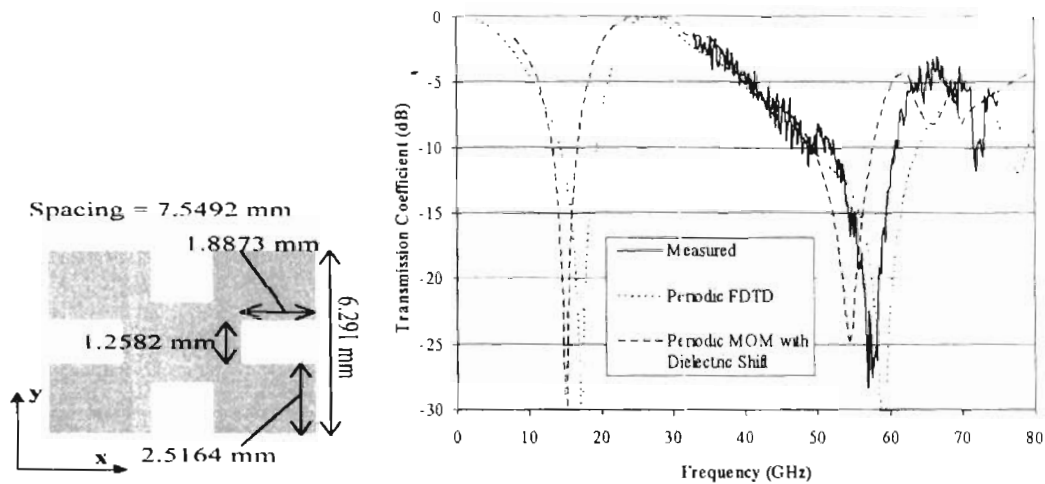
**Figura 34.** Frecuencias de resonancia usando el método del elemento finito  
Frecuencia contra potencia transmitida en Db.



**Figura 35.** Simulación en FEMLAB del Fractal de Mikowski del campo eléctrico a 11 Giga Hertz

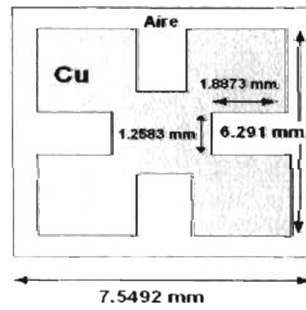
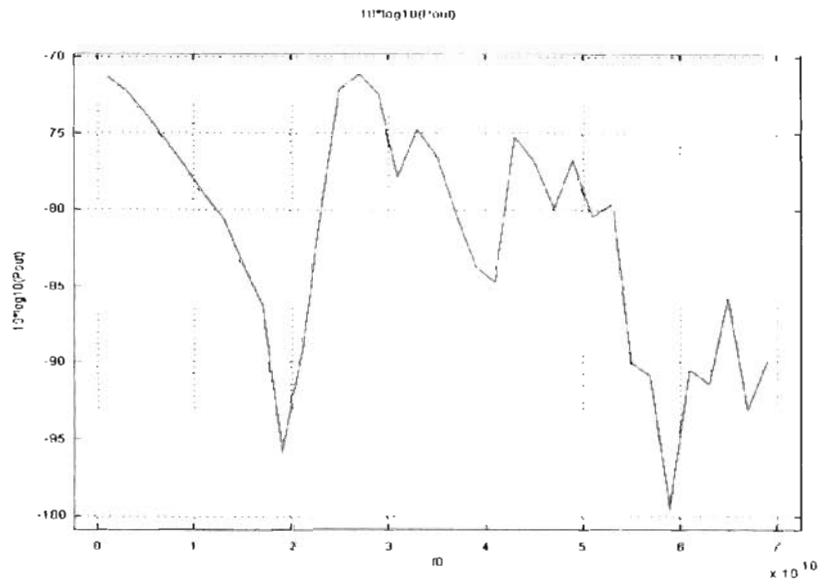
Para el Fractal de Minkowski tiene dos frecuencias de resonancia con dos rechazos de banda el primer rechazo de banda esta cerca de los 15 G Hz y el segundo a los 55 G Hz.

y fue construido en un arreglo de 20 por 26 y también se utilizó el método de diferencias finitas en dominio del tiempo y el método periódico de momentos [30].



**Figura 36.** Grafica con la figura del Fractal de Minkowski de la publicación Self-Similar Prefractal Frequency Selective Surfaces For Multiband and Dual polarized Applications.

Para la simulación de FEMLAB en este ejemplo se tomaron las mismas medidas que las de la publicación y en esta simulación se tuvieron las siguientes frecuencias de resonancia la primera aproximadamente a 19 G Hz y la segunda a 43 G Hz.



**Figura 37.** Grafica con la figura del Fractal de Minkowski de la simulación en Femlab.

## 5.5 Fractal de Sierpinski

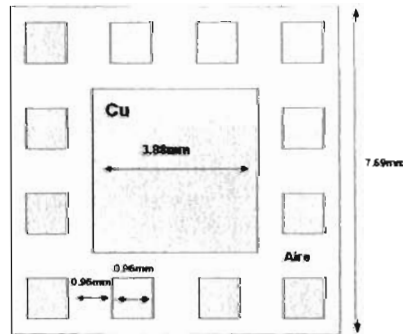
Otros fractales se puede utilizar para diseñar SSF de varias bandas de frecuencia donde las escalas en la geometría son similares al fractal de Sierpinski. Este fractal contiene cuadrados resonantes separadas para no tener ninguna conexión eléctrica. Cada figura de la geometría simulada corresponde a un filtro rechazo de banda. También, el espaciamiento de la geometría para todas las escalas consta con el aumento de iteraciones. Este número de bandas es limitado por las tolerancias que dictan cómo es cada cuadrado pequeño. Este fractal contiene un cuadrado en medio y doce copias alrededor de él, que son un cuarto del cuadrado del centro. Esto se puede expresar de la manera siguiente:

$$\begin{aligned}
 s_{1,2,3,4}(x, y) &= \frac{1}{4}\left(x \pm \frac{3}{8}, y \pm \frac{3}{8}\right) \\
 s_{5,6,7,8}(x, y) &= \frac{1}{4}\left(x \pm \frac{1}{8}, y \pm \frac{3}{8}\right) \\
 s_{9,10,11,12}(x, y) &= \frac{1}{4}\left(x \pm \frac{3}{8}, y \pm \frac{1}{8}\right) \\
 C_{s+1} &= C_s U_{s1}(C_s) U_{s2}(C_s) U_{s3}(C_s) \\
 &\quad U_{s4}(C_s) U_{s5}(C_s) U_{s6}(C_s) \\
 &\quad U_{s7}(C_s) U_{s8}(C_s) U_{s9}(C_s) \\
 &\quad U_{s10}(C_s) U_{s11}(C_s) U_{s12}(C_s)
 \end{aligned} \tag{41}$$

donde,  $C_{s+1}$  es el resultado de los puntos del sistema, y  $s+1$  esta compuesta por la iteración de la unión de los sistemas de doce transformaciones de que  $s_1$  pasa a través de

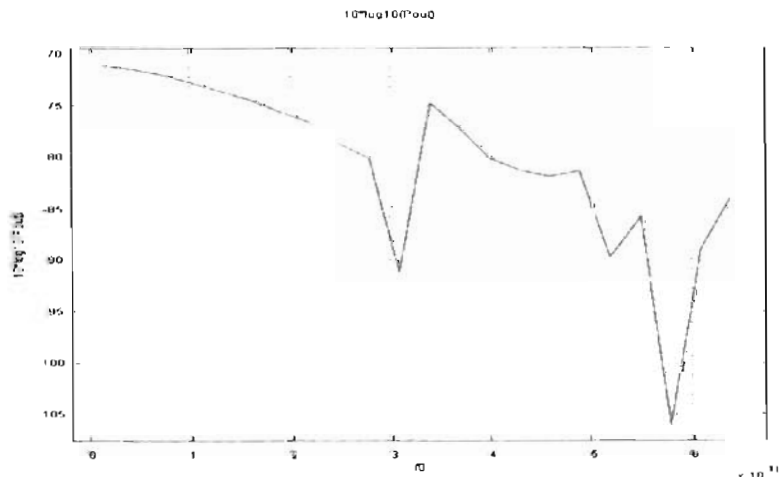
$s_{12}$ .

La primera frecuencia de resonancia es formada por el cuadro grande que se encuentra en el centro a una frecuencia de 3.1 GHz, y la segunda frecuencia de resonancia es generada por los cuadrados pequeños 5.8 GHz como lo muestra la figura 39.

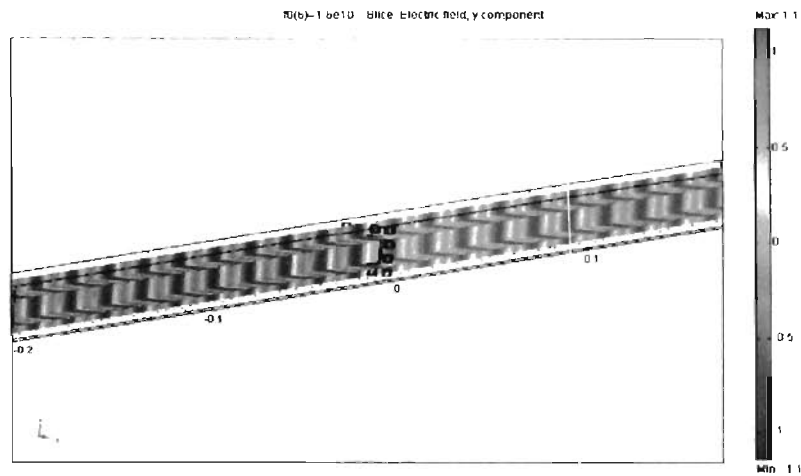


**Figura 38.** Fractal de Sierpinski genera dos rechazos de banda

La figura 39 muestra las características de la transmisión del fractal de Sierpinski en aire en función de la frecuencia, y en la figura 40 la guía de onda con un campo eléctrico con una frecuencia de 16 GHz.

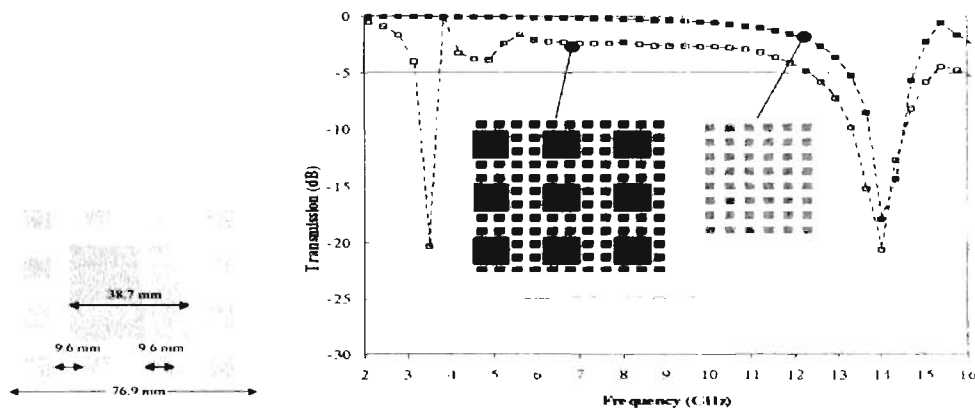


**Figura 39.** Frecuencias de resonancia usando el método del elemento finito  
Frecuencia contra potencia transmitida en Db.



**Figura 40.** Simulación en FEMLAB del Fractal de Sierpinski del campo eléctrico a 16 Giga Hertz

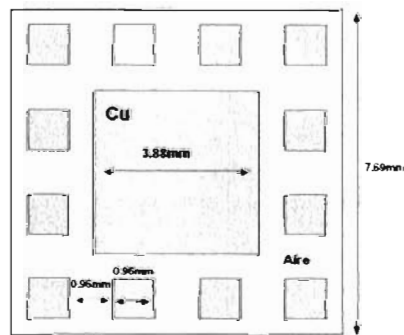
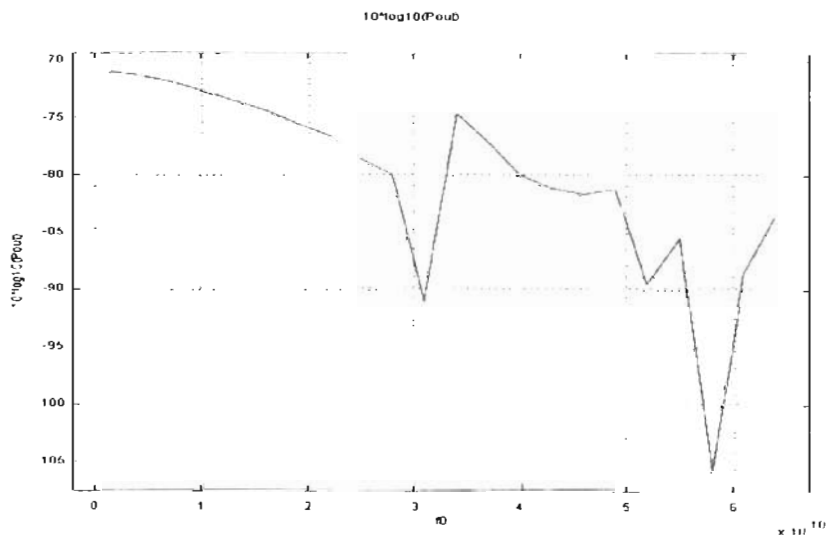
El fractal Sierpinski se ha fabricado con una iteración para demostrar la viabilidad de usar esta estructura como SSF de varias bandas. La pantalla fabricada se ha impreso en un pedazo revestido de cobre. Esta genera dos filtros rechazos de banda que están en 3.5 y 14 giga hertz, que emparejar la disposición de medida [30]. Los elementos del fractal que se fabricaron se ha medido para el campo lejano.



**Figura 41.** Grafica con la figura del Fractal de Sierpinski de la publicación Self-Similar Prefractal Frequency Selective Surfaces For Multiband and Dual polarized Applications.



Para la simulación de FEMLAB en este ejemplo no se tomaron las mismas medidas que las de la publicación y en esta simulación se tuvieron las siguientes frecuencias de resonancia la primera aproximadamente a 31 G Hz y la segunda a 58 G Hz.

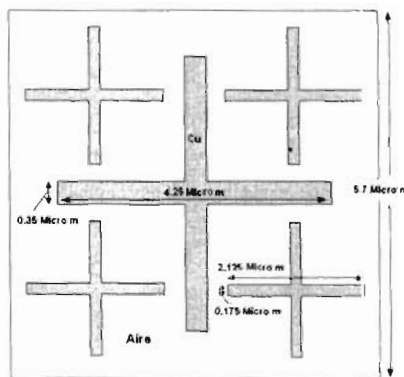


**Figura 42.** Grafica con la figura del Fractal de Sierpinski de la simulación en Femlab.

## 5.6 Fractal de Dipolo Cruzado

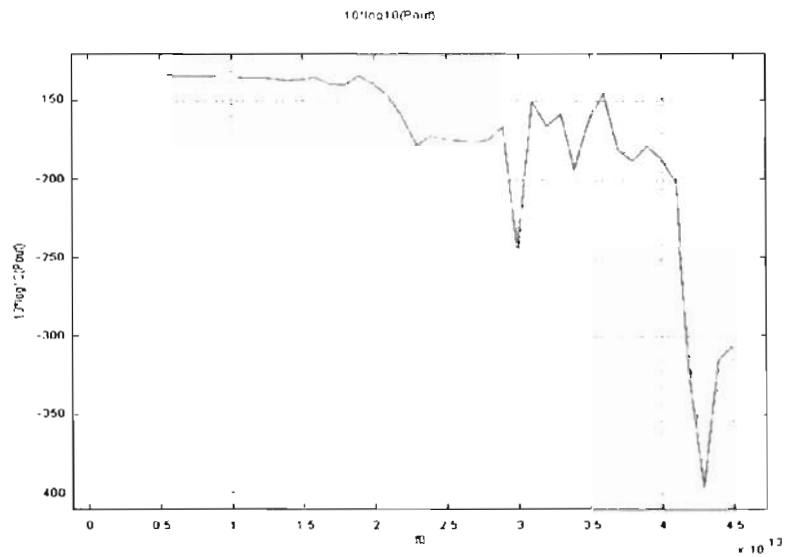
Este diseño es mas impenetrable que el fractal de Sierpinski, en lugar de hacer remiendos resonantes, se utilizan los dipolos cruzados resonantes. Por lo tanto el espacio puede ser mas ajustado, al alternar cada iteración de dipolos cruzados.

Este fractal genera de una forma similar las resonancias que el fractal de Sierpinski pero para la simulación se usaron dos iteraciones en lugar de tres debido a que la forma de la figura no pudo simularse en FEMLAB. La primera resonancia es de 3T Hz, y la segunda resonancia se encuentra en 4.3T Hz como lo muestra la figura 44 .

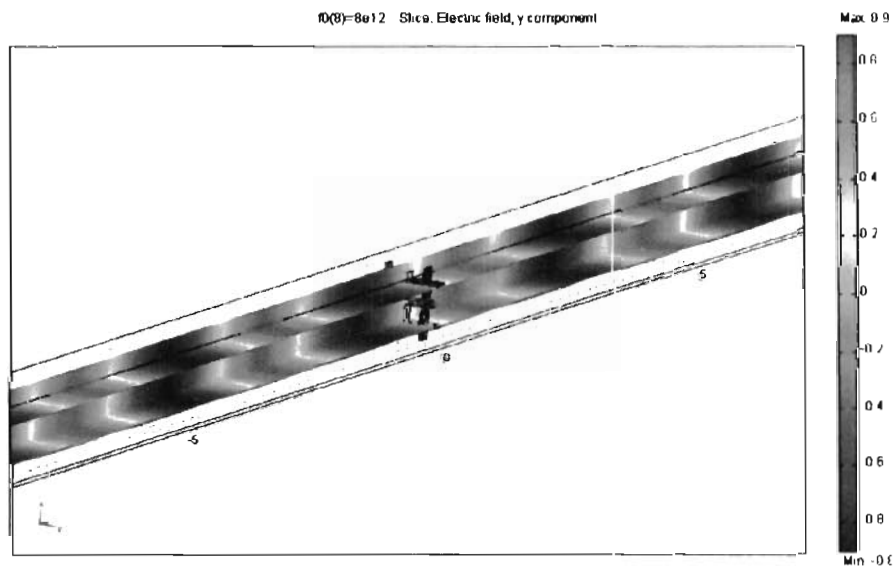


**Figura 43.** Fractal de Dipolo de cruz genera dos rechazos de banda

La figura 44 muestra las características de la transmisión del fractal de Sierpinski en aire en función de la frecuencia, y en la figura 45 la guía de onda con un campo eléctrico con una frecuencia de 8 THz.

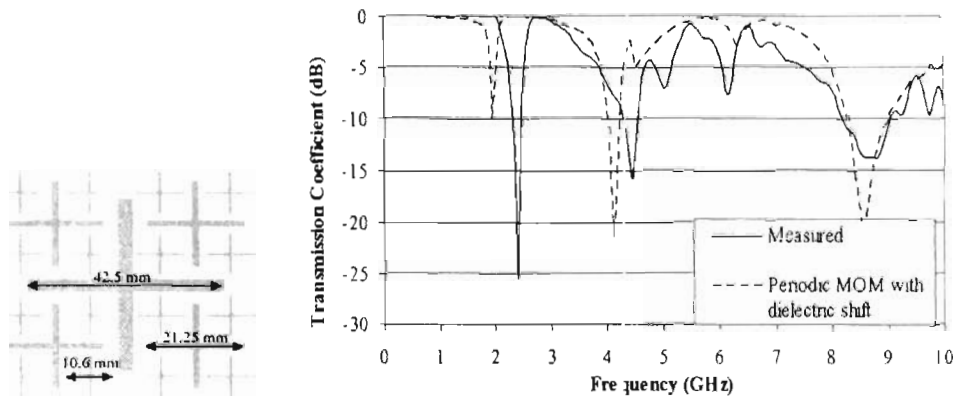


**Figura 44.** Frecuencias de resonancia usando el método del elemento finito  
Frecuencia contra potencia transmitida en Db.



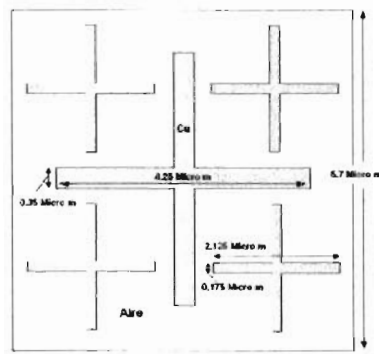
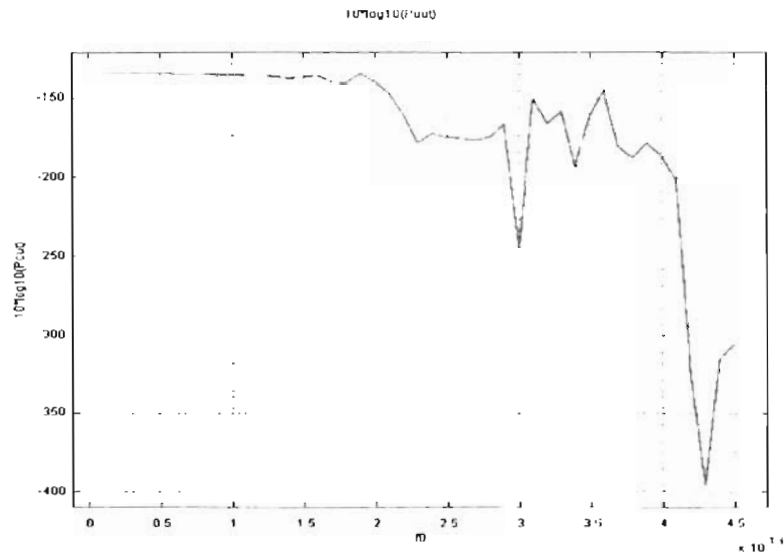
**Figura 45.** Simulación en FEMLAB del Fractal de Dipolo de cruz del campo eléctrico a 8 Tera Hertz

Este diseño es más comprimido que el fractal de Sierpinski, para usar arreglos resonantes, se utilizan los dipolos cruzados resonantes. Por lo tanto, el espaciamiento entre ellos puede ser más apretado. El cambio de tamaño en medio cada iteración es una mitad. Este fractal se genera de una manera similar al fractal de Sierpinski, donde la geometría se copia cuatro veces y la escala por una mitad para cada iteración. Genera tres filtros rechazo de banda, con un factor de posicionamiento de dos entre ellos en aproximadamente 2.2, 4.5, y 9 GHz. Se utilizó el método de diferencias finitas en dominio del tiempo y con método periódico de momentos [30].



**Figura 46.** Grafica con la figura del Fractal de Dipolo Cruzado de la publicación Self-Similar Prefractal Frequency Selective Surfaces For Multiband and Dual polarized Applications.

Para la simulación de FEMLAB en este ejemplo no se tomaron las mismas medidas que las de la publicación y en esta simulación se tuvieron las siguientes frecuencias de resonancia la primera aproximadamente a 30 THz y la segunda a 43 THz.



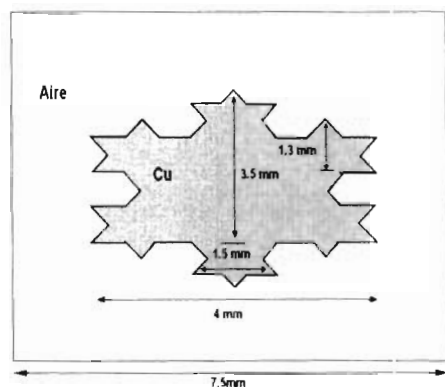
**Figura 47.** Grafica con la figura del Fractal de Dipolo de cruz de la simulación en Femlab.

La información para el Fractal de Minkowski, Fractal de Sierpinski, Fractal Dipolo cruzado y para el arreglo de cuadrados se tomo de una publicación llamada Self-Similar Prefractal Frequency Selective Surfaces For Multiband and Dual polarized Applications y se utilizaron, el método de diferencias finitas en dominio del tiempo y con método periódico de momentos.

## 5.7 Fractal de Koch

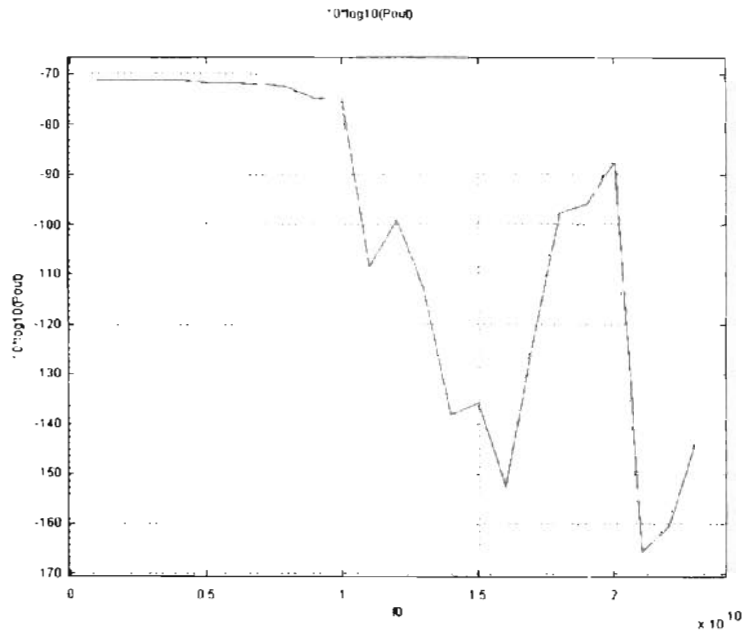
En el fractal de Koch la corriente genera frecuencias de resonancias fundamental de una orden alto que otros fractales. Y el comportamiento del fractal de Koch es muy parecido a las resonancias que aparecen el fractal de minkowski, el elemento de koch puede ser utilizado para generar resonancias duales. Esta estructura se puede poner en varios arreglos de la rejilla para realizar diferentes polarizaciones.

El fractal de koch esta formado por dos triángulos, un triángulo invertido sobre el otro el cual genera una frecuencia de resonancia de 1.6 G Hz, y por triángulos pequeños en las esquinas del fractal el cual genera otra resonancia de 2.2 G Hz aproximadamente como se ve en la figura 49.

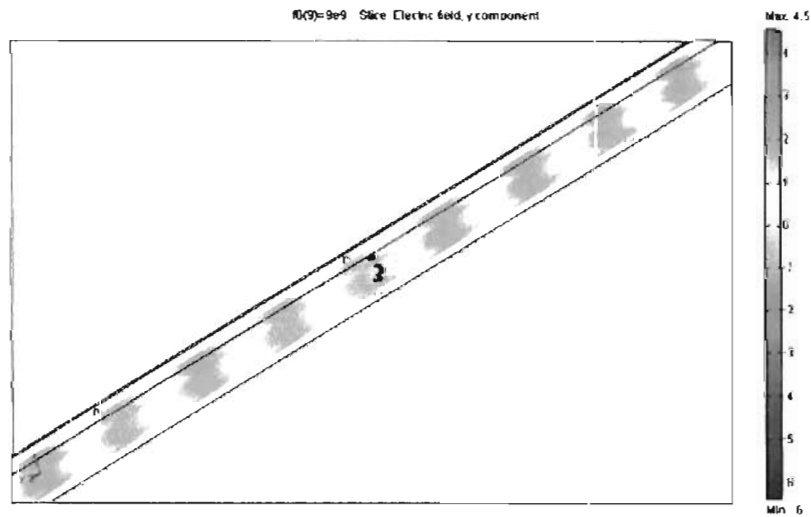


**Figura 48.** Fractal de Koch genera dos rechazos de banda

La figura 49 muestra las características de la transmisión del fractal de Sierpinski en aire en función de la frecuencia, y en la figura 50 la guía de onda con un campo eléctrico con una frecuencia de 9 GHz.

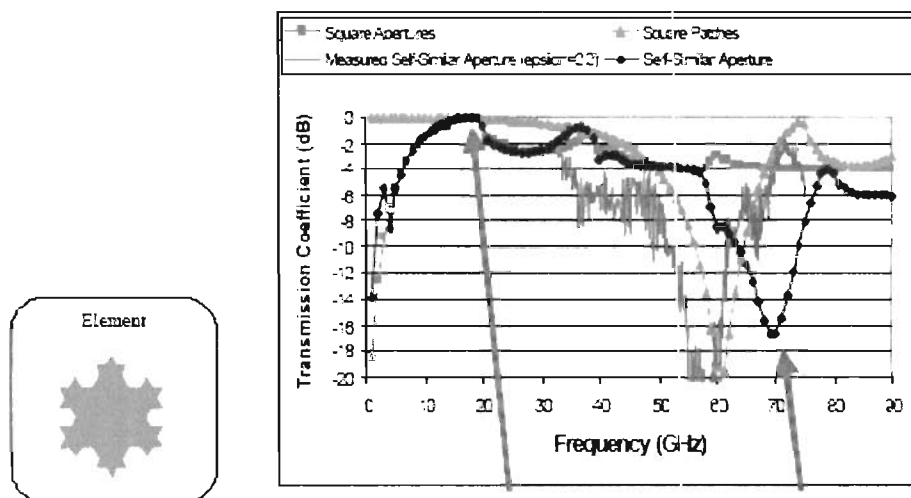


**Figura 49.** Frecuencias de resonancia usando el método del elemento finito  
Frecuencia contra potencia transmitida en Db.



**Figura 50.** Simulación en FEMLAB del Fractal de Koch del campo eléctrico  
a 9 Giga Hertz

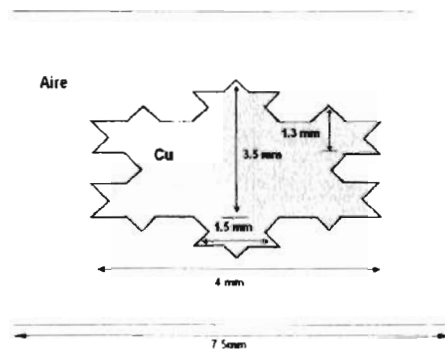
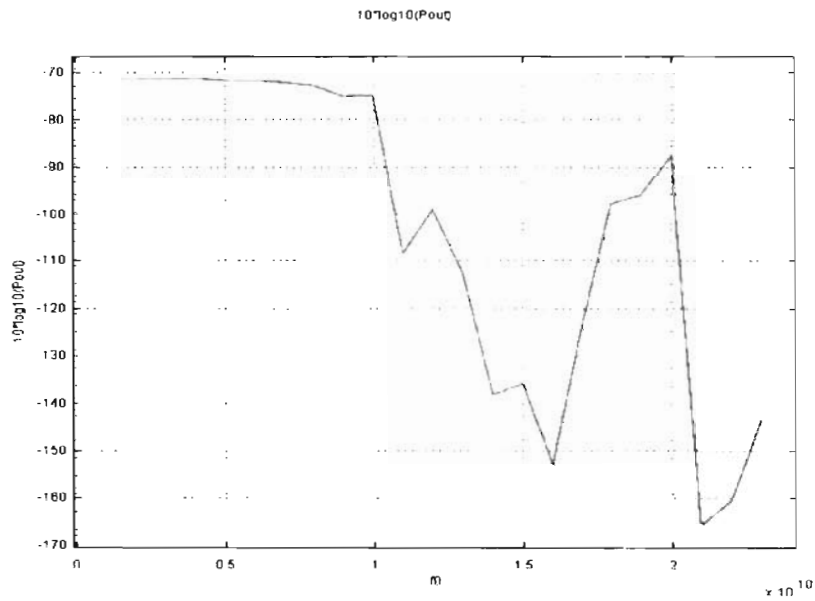
Las corrientes localizadas en el arreglo de Koch generan fundamental resonancias de una orden más alta que los demás fractales. El comportamiento en la resonancia, es similar al fractal de Minkowski, el fractal de Koch puede ser utilizado generar resonancias duales.



**Figura 51.** Grafica con la figura del Fractal de Koch de la publicación Fractal FSS: Various Self-Similar Geometries Used for Dual-Band and Dual-Polarized FSS.

Para la simulación de FEMLAB en este ejemplo no se tomaron las mismas medidas que las de la publicación y en esta simulación se tuvieron las siguientes frecuencias de resonancia la primera aproximadamente a 16 G Hz y la segunda a 21 G Hz [31].





**Figura 52.** Grafica con la figura del Fractal de Koch de la simulación en Femlab.

La información para el Fractal de koch se tomo de una publicación llamada Fractal FSS: Various Self-Similar Geometries Used for Dual-Band and Dual-Polarized FSS y se utilizaron, el método de diferencias finitas en dominio del tiempo y con método periódico de momentos.

## Capítulo 6

### CONCLUSIONES.

La metodología de diseño de SFSF basada en simulaciones electromagnéticas fue ideada y evaluada. El software FEMLab resulto adecuado en encontrar las resonancias de las SFSF. Aunque se pueden obtener las resonancias de las SFSF, FEMLab no proporciona información detallada del comportamiento de las mismas, mas allá de la frecuencia de resonancia. FEMLab dio resultados aceptables a frecuencias relativamente bajas (GHz), a frecuencias mas altas (THz) los resultados fueron menos fieles a los publicados. FEMLab limita el numero de iteraciones permitidas en la SFSF, ya que los requerimientos de memoria aumentan notablemente. Ha sido demostrado cómo los fractales pueden desempeñar un papel importante en los diseños electromagnéticos. Antes de realizar una implementación se puede comprender mejor el funcionamiento para encontrar el filtro adecuado del espectro frecuencias que requiera la misma.

## 6.1 TRABAJO A FUTURO

Para ampliar la investigación de SFSF se recomienda modelar mas figuras geométricas para poder analizar el coeficientes de transmisión con sus respectivas resonancias del campo eléctrico inducido en las superficies. Las simulaciones fueron desarrolladas en un sustrato de aire, se pueden realizar sobre otro sustrato diferente que puede ser el silicio, para observar como reaccionan las frecuencias de resonancia. Se inicio la simulación de una frecuencia que pasa sobre la SFSF de un sustrato diferente a otro, y ver como se induce la corriente sobre la superficie fractal. Para estas SFSF con las variadas simulaciones que se han desarrollado en esta tesis se sugiere se realice una implementación ya sea para cúpulas de antenas, para proteger la radiofrecuencias, usándola como divisor de haz para los rayos láser, bloquear frecuencias para poder tener una transmisión limpia en los teléfonos celulares en cualquier espacio que uno se encuentre ya sea por la construcción de edificios o conduciendo en carretera y para proteger a los seres humanos de las ondas electromagnéticas producidas por la computadoras y celulares.

## 7. REFERENCIAS

- [1] J. D. Kraus, R. J. Marheftka, "Antennas for All Applications", Third Edition, McG Hill, 2002.
- [2] I. Puscasu, D. Spencer, G. D. Bareman, Refractive-index and element-spacing effects on the spectral behavior of infrared frequency-selective surfaces, *Applied Optics*, 39 (10), (2000), pp. 1570-1574.
- [3] T. F. Eibert, Y. E. Erdemli, and J. L. Volakis, "Upgrading the hybrid finite element – boundary integral method using multilayer periodic Green's functions", 2002 IEEE Antennas and Propagation Symposium Digest, San Antonio, TX, Vol. III, pp. 282-285.
- [4] A. L. P. S. Campos, A. G. d'Assunção, "Scattering by FSS on anisotropic substrate for TE and TM excitation", *IEEE Trans on Microwaves Theory and Techniques*, 50 (1), (2002), pp. 72-76.
- [5] A. L. P. S. Campos, A. G. d'Assunção, "Scattering parameters of FSS on anisotropic layers at millimeter wave frequencies", *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 23 (1), (2002), pp. 123-133.
- [6] P. Harms, R. Mittra, and W. Ko, "Implementation of periodic boundary condition in the FDTD algorithm for FSS structure", *IEEE Trans on Antennas and Prop*, 42 (9), (1994), pp. 1317-1324.
- [7] A. L. P. S. Campos, A. G. d'Assunção, M. L. C. Gomes Neto, "Analysis of frequency selective surfaces at millimeter wave band using the Hertz vector potential method", *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 26 (6), (2005), pp. 843-854.
- [8] COMSOL, "FEMLAB 3: Multiphysics modeling", Product Catalog, Winter 2005.

- [9] Carlos A. Escobar "Antenas Fractales", GITA ( Grupo de Investigación en Telecomunicaciones y Antenas ), Universidad de Antioquia.
- [10] Umran S, Inan, "Electromagnetics waves," Ed. New York: Prentice-Hall, 2000, pp. 5-53.
- [11] H. Petgen, H. Jurgens, and D. Saupe, Chaos and fractals: New Frontier of Science. New York: Springer-Verlag, 1992.
- [12] Mandelbrot Benoit B," The fractal geometry of nature", New York , W.H: Freeman, 1977, pp. 5-53.
- [13] <http://es.wikipedia.org/wiki/Fractal> Copyright (C) 2000,2001,2002 Free Software Foundation, Inc.51 Franklin St, Fifth Floor, Boston, MA 02110-1301 USA Everyone is permitted to copy and distribute verbatim copies of this license document, but changing it is not allowed.
- [14] WERNER, Douglas H y MITRA, Raj. Frontiers in Electromagnetics. IEEE Antennas & Propagation Society. New York 2000.
- [15] V. K. Varadan, K. J, Vinoy, K. A. Jose, and V. V. Varadan, "Conformal fractal antennas and FSS for low RCS applications," in Proc. SPIE-Int. Soc. Optical Engineering, vol. 3990, March 2000, pp. 138-145.
- [16] Miguel Fernando, Alejandro Valero, "Introducción Parámetros de Antenas", Universidad Politécnica de Valencia, pp 1-16.
- [17] Jose Vicytor Rodriguez rodriguez, "Radiowave Propagation through Window Panes and Reinforced Concrete Structures An application of Frequency Selective Surface techniques," Sweden : department of electrosience Lund University, 2001, pp. 1-6.

- [18] C. Puente, J. Romeu, R. Pous, X. Garcia, and F. Benitez, Fractal multiband antenna based on the Sierpinski gasket,” *Electron. Lett.*, “vol. 32,no. 1,Jan. A, 1996 pp. 1-2.
- [19] A. L. P. S. Campos, A. G. d’Assunçao, M. L. C. Gomes Neto, “Analysis of frequency selective surfaces at millimeter wave band using the Hertz vector potential method”, *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 26 (6), (2005), pp. 843-854.
- [20] Peitgen, H., H. Jürgens and D. Saupe. *Chaos and Fractals: New Frontiers of Science*. Springer-Verlag. New York.1992
- [21] Ignacio Lamas Garro, “Líneas de Transmisión para microondas en comunicaciones inalámbricas ”, *Ingenierías Abril-Junio 2004*, Vol. VII, No. 23, pp 37-45.
- [22] Puente Baliarda, C., J. Romeu, R. Pous, and A Cardama. “On the Behavior or the sierpinski Multiband Fractal Antena.” *IEEE Transsactions and propagation*, April 1998, pp. 517-24.
- [23] Benedick A. Munk, “Reflection Properties of Periodic Surfaces of Loaded Dipoles,” *IEEE Trans. on Antennas and Propagat*, Vol. AP-19, Sep 1971, pp. 612-617.
- [24] Romeu, Jordi and Yahya Ramat-Samii. “Fractal FSS: A novel Dual- Band Frequency selective surface.” *IEEE Transsactions on Antennas and propagation*, July 2000, pp. 1097-105.
- [25] Kraus-Fleisch “Electromagnetism with applications,” five edition, p.p. 143-146.
- [26] COMSOL, “FEMLAB 3: Multiphysics modeling”, *Product Catalog*, Winter 2005.
- [27] Documentation Femlab “Plane Wave Incident on a periodic Structure,”p.p.1-16.
- [28] Numeric Análisis of Frecuency Selective Surfaces.

- [29] Brian Monacelli, Jonathan B Pryor, Ben A Munk , Dale Kotter, Glenn D. Boreman, "Infrared Frequency selective surfaces: desing, fabricacion and measurement", Orlando Florida, abril 2004.
- [30] J. P. Gianvittorio, Y. Rahmat-Samii, and J. Romeu, "Tractal FS S: vadous self-similar geometries used for dual-band and dual-polarized FSS," in Proc. IEEE Antennas and Propagation Soc. Int. Symp., vol. 3, 200 1, pp. 64"3.
- [31] John P , Yahya Rahmat-Sammi and jordi Romeu "Various Self Similar geometries used for Dual band and dual polarized FSS," Los Angeles California 90095-1594.