

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
LABORATÓRIO DE ELETROMAGNETISMO E MICROONDAS APLICADOS**

Relatório de Estágio Integrado

***Desenvolvimento de uma antena diretiva usando a
geometria fractal para aplicações RFID.***

ESTAGIÁRIO: Bruno Roberto Franciscatto

PROFESSOR ORIENTADOR: Rômulo Raimundo Maranhão do Valle

LOCAL DO ESTÁGIO: Laboratório IMEP-LAHC – MINATEC (Grenoble, França)

CARGA HORÁRIA: 700 horas

Campina Grande - PB, Novembro 2010

Desenvolvimento de uma antena diretiva usando a geometria fractal para aplicações RFID

Estágio integrado do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento parcial às exigências para obtenção do Grau de Engenheiro Eletricista.

Bruno Roberto Franciscatto
ESTAGIÁRIO

Rômulo Raimundo Maranhão do Valle
PROFESSOR ORIENTADOR

Campina Grande – PB

Novembro de 2010

AGRADECIMENTOS

Este estágio foi realizado dentro do programa de intercâmbio bilateral BRAFITEC apoiado pelo Ministério Brasileiro (MEC - CAPES), os Ministérios Franceses (AEM - MENESR - DREIC) e cuja coordenação francesa é assegurada pelo CDEFI.

O sucesso deste projeto vem da capacidade de acreditar que podemos tornar o conhecimento universal!

Agradeço a todos os órgãos responsáveis pelo programa BRAFITEC, às instituições de acolhimento e IMEP-LAHC – MINATEC (França) e à UFGG (Brasil), aos professores que confiaram em mim e me apoiaram: Tan-Phu Vuong, Glauco Fontgalland, Rômulo Raimundo Maranhão do Valle e Raimundo Freire.

Em um nível pessoal, agradeço a minha família que me apóia todos os dias, meus amigos e também aos companheiros de estágio.

Obrigado!!!

Merci beaucoup!!!



Sumário

| | |
|---|----|
| AGRADECIMENTOS | 3 |
| RESUMO | 8 |
| 1. Introdução | 9 |
| 2. Apresentação do laboratório | 9 |
| 2.1. MINATEC..... | 9 |
| 2.2. IMEP, Institut de Microélectronique Electromagnétisme et Photonique..... | 10 |
| 3. Metodologia | 11 |
| 4. RFID | 12 |
| 4.1. Introdução | 12 |
| 4.2. O que é uma etiqueta RFID? | 12 |
| 4.2.1. A etiqueta | 12 |
| 4.2.2. Funcionamento | 13 |
| 4.2.3. Comparação entre RFID x Código de barra | 13 |
| 4.2.4. Aplicações do RFID | 14 |
| 5. Geometria Fractal..... | 15 |
| 5.1. Diminuição da frequência de ressonância: | 17 |
| 5.2. Diminuição da área da antena..... | 18 |
| 5.3. Múltiplas frequências de ressonância | 21 |
| 6. Projeto, simulação e medições das antenas | 22 |
| 6.1. Sierpinski Gasket | 22 |
| 6.1.1. Design da Antena Sierpinski Gasket | 23 |
| 6.1.2. Simulação da antena Yagi Sierpinski Gasket | 24 |
| 6.1.3. Implementação física: Antena Yagi Sierpinski Gasket..... | 34 |
| 6.1.4. Medições da antena Yagi Sierpinski Gasket | 36 |
| 6.1.5. Comparação de resultados..... | 38 |
| 6.2. Koch Island (Snowflake) | 38 |
| 6.2.1. Concepção da antena Koch Island..... | 38 |
| 6.2.2. Simulação da antenna Koch Island..... | 40 |
| 6.2.3. Implementação física : « Les Rois » | 49 |
| 6.2.4. Medições do arranjo de duas antenas « Les rois » | 50 |

| | | |
|--------|---|----|
| 6.2.5. | Comparação de resultados..... | 50 |
| 7. | Conclusão | 51 |
| 8. | Referências bibliográficas..... | 52 |
| 9. | Anexos | 53 |
| 9.1. | Estimação financeira | 53 |
| 9.1.1. | Despesas com material de expediente | 53 |
| 9.1.2. | Despesas com material técnico..... | 53 |
| 9.2. | Lay-out das antenas..... | 54 |
| 9.2.1. | Yagi Sierpinski Gasket..... | 54 |
| 9.2.2. | Les Rois | 55 |
| 9.3. | Código MATLAB® :..... | 55 |

Tabela de figuras

| | | |
|---|---|----|
| Figura 1: Metodologia do estagio..... | 12 | |
| Figura 2: Forma fractal de uma raio | Figura 3: Forma fractal de um terreno..... | 16 |
| Figura 4: Forma fractal do romanesco | Figura 5: Forma fractal de uma folha..... | 16 |
| Figura 6: Forma fractal de uma planta | Figura 7: Forma fractal de um nautilus..... | 16 |
| Figura 8: Forma fractal de um pavão..... | | 16 |
| Figura 9: Sierpinski Carpert | Figura 10: Sierpinski Gasket..... | 17 |
| Figura 11: Highway's Dragon..... | | 17 |
| Figura 12: Koch Island -Snowflake. | Figura 13 : Durer's pentagons..... | 17 |
| Figura 14: A evolução da antena de impedância Koch Fractal Fractal várias iterações..... | | 18 |
| Figura 15: Volume sem iteração (iteração 0)..... | | 19 |
| Figura 16: Volume da primeira iteração (iteração 1)..... | | 19 |
| Figura 18: Volume da segunda iteração (iteração 2)..... | | 20 |
| Figura 18: Volume da terceira iteração (iteração 3)..... | | 20 |
| Figura 19 : Estrutura da quarta iteração da antena Koch Island com seu respectivo parâmetro S11.. | | 21 |
| Figura 20: A antena dipolo Sierpinski Gasket (sem fractal) e seu parâmetro S11..... | | 21 |
| Figura 21: A antena dipolo Sierpinski Gasket 1ª iteração e seu parâmetro S11..... | | 22 |
| Figura 22 : A antena dipolo Sierpinski Gasket 2ª iteração e seu parâmetro S11..... | | 22 |
| Figura 23 : evolução das iterações para um monopolo Sierpinski Gasket..... | | 23 |
| Figura 24: Iterated Function System(IFS) para a criação da geometria da Sierpinski Gasket..... | | 24 |
| Figura 25: A altura de cada Sierpinski "Sub-Gasket"..... | | 25 |
| Figura 26 : Dipolo Sierpinski Gasket..... | | 27 |
| Figura 27: Parâmetros S11 - Dipolo Sierpinski Gasket..... | | 28 |
| Figura 28: Diagrama de irradiação - Dipolo Sierpinski Gasket..... | | 28 |
| Figura 29: Configuração antena Sierpinski Gasket com diretores..... | | 29 |
| Figura 30: Variando a distância entre a antena e o diretor..... | | 29 |
| Figura 31: Diretividade para as diferentes escalas físicas do diretor (Variável "ss" = escala física do diretor)..... | | 30 |
| Figura 32: S11 para as diferentes escalas físicas do diretor (Variável "ss" = escala física do diretor).. | | 30 |
| Figura 33: estrutura acrescida de um plano refletor metálico..... | | 31 |
| Figura 34: Parâmetro S11 variando-se a distância entre a antena e o plano refletor. ("Dp" = distância variável entre a antena e o plano refletor metálico)..... | | 32 |
| Figura 35: Arranjo de duas antenas Yagi Sierpinski Gasket..... | | 32 |
| Figura 36: Parâmetros S11 da antena Yagi Sierpinski Gasket..... | | 33 |
| Figura 37: Diretividade da antena Yagi Sierpinski Gasket..... | | 33 |
| Figura 38: Banda passante da antena Yagi Sierpinski Gasket..... | | 34 |
| Figura 39: Espaçamento entre as diversas camadas da estrutura da antena..... | | 34 |
| Figura 40: vista frontal do protótipo final..... | | 35 |
| Figura 41: Vista superior | Figura 42: Vista em perspectiva..... | 36 |
| Figura 43: Medição dos parâmetros da antena Yagi Sierpinski Gasket com o VNA..... | | 36 |
| Figura 44: Medições dos parâmetros S11(755 MHz à 950 MHz) - Antena Yagi Sierpinski Gasket..... | | 37 |
| Figura 45: Medições dos parâmetros S11(0 GHz à 10GHz) - Antena Yagi Sierpinski Gasket..... | | 37 |
| Figura 46 : evolução das iterações da antena Koch Island..... | | 38 |

| | |
|---|----|
| Figura 47 : Procedimento para a construção da forma geométrica Koch Island | 39 |
| Figura 48: Os quatro segmentos que formam a base geral da antena Koch fractal para a primeira iteração..... | 40 |
| Figura 49: Geometria gerada pelo software MATLAB..... | 41 |
| Figura 50 : Estrutura exportada do MATLAB para o CST..... | 42 |
| Figura 51: Koch Island (SnowFlake)..... | 42 |
| Figura 52: Ponto de excitação (ponto 1) | 43 |
| Figura 53: O parâmetro S11- antena Koch Island..... | 43 |
| Figura 54: diagrama de irradiação simulado para a antena Koch Island | 44 |
| Figura 55: Dimensões físicas da antena Koch Island | 44 |
| Figura 56: distribuição do campo elétrico na superfície da antena Koch Island..... | 45 |
| Figura 57: Parâmetros S11 antena Koch Island com o substrato ROGERS 4003 sem perdas | 45 |
| Figura 58: Diagrama de irradiação da antena Koch Island com o substrato ROGERS 4003 sem perdas | 46 |
| Figura 59: Antena « les rois » | 46 |
| Figura 60 : Parâmetros S11 da antena « les rois » | 47 |
| Figura 61: Diretividade da antena « les rois » | 47 |
| Figura 62: dimensões físicas da antena « Les Rois » | 48 |
| Figura 63: Parâmetros S11 do arranjo de duas antenas « Les Rois »..... | 48 |
| Figura 64: Diretividade do arranjo de duas antenas « Les Rois » | 49 |
| Figura 65: arranjo de duas antenas « Les Rois » | 49 |
| Figura 66: Parâmetros S11 medidos do arranjo de duas antenas « Les Rois »..... | 50 |
| Figura 67: Lay-out das antenas Sierpinski Gasket | 54 |
| Figura 68 : Lay-out dos diretores das antenas Sierpinski Gasket | 54 |
| Figura 69 : Layout da antena Les Rois | 55 |

Lista das tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1 : características para as frequências de operação de RFID | 13 |
| Tabela 2 : características de códigos de barras e etiquetas RFID | 14 |
| Tabela 3 : comparação para diferentes iterações da geometria fractal | 21 |
| Tabela 4 : o processo de concepção do monopolo Sierpinski Gasket..... | 26 |
| Tabela 5: especificações substrato FR4..... | 27 |
| Tabela 6 : parâmetros geométricos do dipolo | 27 |
| Tabela 7: Comparação da diretividade para diferentes técnicas empregadas | 31 |
| Tabela 8: Resultados da Simulação: Arranjo Yagi Sierpinski Gasket | 33 |
| Tabela 9: materiais usados para fazer a execução física da antena Yagi Sierpinski Gasket..... | 35 |
| Tabela 10 : comparação de resultados entre a simulação foi feita com o software CST e as medições com o VNA..... | 38 |
| Tabela 11: especificações do substrato RO4003..... | 42 |
| Tabela 12 : comparações dos resultados entre a simulação feita no software CST e as medições realizadas com o VNA..... | 50 |
| Tabela 13: Despesas com material de expediente..... | 53 |
| Tabela 14 : Despesas com material técnico | 53 |
| Tabela 15: Despesas diversas | 53 |

RESUMO

Em sistemas de comunicação sem fio, as antenas banda larga, multifrequenciais e altamente diretivas são muito úteis para aplicações comerciais e militares, especialmente em aquelas para identificação por radiofrequência (RFID).

Desde o seu surgimento até agora, a tecnologia RFID tem visto a sua técnica e suas aplicações evoluírem de forma exponencial. Podemos citar como exemplos de aplicações RFID: a substituição do código de barras, etiquetas antifurto, monitoramento e segurança das pessoas, aluguel e comodato de equipamentos, pagamentos automáticos, identificação e localização de pessoas e seres vivos, ou a melhoria da logística.

O campo de aplicações sem fio experimenta um forte crescimento em suas necessidades de antenas pequenas, banda larga e diretivas que permitam a integração entre diferentes tecnologias sem fio. Para criar tais antenas, existem pesquisas orientadas em várias direções; uma dessas é a utilização da geometria fractal. Tradicionalmente, uma antena opera em uma frequência única ou em duas frequências diferentes, enquanto uma antena com geometria fractal pode ter várias frequências de ressonância.

Neste estágio, propõe-se projetar uma antena multifrequencial altamente diretiva e de banda larga para aplicações do sistema RFID.

1. Introdução

Em sistemas de comunicação sem fio, as antenas banda larga, multifrequenciais e altamente diretivas são muito úteis para aplicações comerciais e militares, especialmente em aplicações de identificação por radiofrequência (RFID).

Desenvolvidos desde os anos 60, os sistemas RFID (Radio Frequency Identification), foram concebidos durante a Segunda Guerra Mundial, quando as ondas de rádio foram usadas para identificação de aeronaves aliadas (IFF, Identificar Friend or Foe).

Com um modo de operação simples de “tudo ou nada”, armazenamento e processamento de informações, estas aplicações abrangem áreas que vão de sensoriamento remoto (a identificação dos animais, localização de produtos/pessoas, etiquetas antifurto, ...), transações da vida cotidiana (cartões crédito, carteira de transporte, passaporte...), sistemas de pedágio, etc.

O campo de aplicações sem fio experimenta um forte crescimento em suas necessidades de antenas pequenas, banda larga e diretivas que permitam a integração entre diferentes tecnologias sem fio. Para criar tais antenas, existem pesquisas orientadas em várias direções, uma dessas é a utilização de elementos fractais. Tradicionalmente, a antena opera em uma frequência única ou em duas frequências diferentes, enquanto uma antena com geometria fractal pode-se ter várias frequências de ressonância.

Este estágio foi realizado dentro de um programa de colaboração entre as instituições acadêmicas: UFCG (Universidade Federal de Campina Grande) no Brasil e INP Grenoble (França), através do programa de intercâmbio BRAFITEC financiado pela CAPES. Este projeto de intercâmbio tem como mentores Dr. Raimundo Freire (Professor da Universidade Federal de Campina Grande - PB) no Brasil e na França o Dr. Tan-Phu Vuong (Professor em Grenoble INP).

2. Apresentação do laboratório

O estágio foi desenvolvido no ambiente do MINATEC localizado em Grenoble - França. As atividades de pesquisa foram realizadas no laboratório IMEP-LAHC (Institut de Microélectronique Electromagnétisme et Photonique et le Laboratoire d'Hyperfréquences et de Caractérisation).

2.1. MINATEC

O MINATEC inclui cinco fatores-chave de sucesso:

> Uma abordagem global para a inovação:

- Imediata aplicação industrial na exploração de saltos tecnológicos. Minatec implementa uma abordagem global para a inovação, que é essencial para o sucesso;
- A transição de microeletrônica e nanotecnologia avançada
- Alterações de microcomponentes heterogêneos
- Design* de comunicação de objetos e dispositivos móveis do futuro.

> ***Uma forte concentração de competências e recursos***

3.500 engenheiros, pesquisadores e acadêmicos trabalham em torno dos equipamentos e dos meios tecnológicos mais avançados. Efeitos de proximidade e multidisciplinaridade entre os profissionais resultam numa concentração estimulante para acelerar o processo de inovação.

> ***Uma estratégia de alianças e parcerias internacionais***

Esta concentração de talento floresce num ambiente aberto e atraente para os melhores cientistas internacionais e tecnólogos. A dinâmica das redes e colaborações estabelecidas com os pólos de excelência complementares aumentam a eficácia do Minatec ®.

> ***A política de investimento constante e ambicioso***

MINATEC mobilizou 150.000.000 € entre 2002 e 2006 para financiar novas infra-estruturas, além de 250 milhões de euros do CEA-LETI e Grenoble INP. Um orçamento em sinergia com os 4 bilhões de euros investidos nos últimos dez anos pela indústria Microelectronics Grenoble-Isère.

> ***Um grupo de trabalho dedicado à ciência e tecnologia***

Grenoble-Isère tem a indústria científica, tecnológica e meios necessários para fazer o ambiente do MINATEC à altura das suas ambições:

- Uma base científica e acadêmica de 17.000 postos de trabalho em pesquisa, 220 laboratórios e cinco centros de pesquisa internacionais, 53.000 alunos, 10 escolas de engenharia.
- A poderosa indústria de microeletrônica local de 13.350 profissionais (incluindo 3.000 na pesquisa),
- 30 empresas internacionais e 20 em fase de arranque com forte potencial criadas há 5 anos.
- O apoio decisivo dos governos locais: o Conselho Geral do Isère (proprietário do Minatec ®), Rhone-Alpes, Grenoble Alpes Métropole e Cidade de Grenoble.

2.2. IMEP, Institut de Microélectronique Electromagnétisme et Photonique

IMEP tem sido uma nova unidade de investigação do CNRS / INPG / UJF criado em janeiro de 2001 pela fusão de dois laboratórios antigos: LEMO (Laboratório de Eletromagnetismo Microondas e Optoeletrônica) e LPCs (Componentes Semicondutores Laboratório de Física). Em 2007, a consolidação do IMEP e LAHC, Laboratório de Microondas e Caracterização, deu à luz o IMEP-LAHC, CNRS UMR UMR5130 / Grenoble-INP / Universidade de Savoie.

As atividades de pesquisa do IMEP-LAHC cobrem uma área muito ampla (materiais, tecnologias, componentes, circuitos e sistemas). As pesquisas são realizadas de forma interdisciplinar com os nossos parceiros nanofísicos, químico de materiais, ou projetistas de circuitos e sistemas eletrônicos e optoeletrônicos.

Localizado na convergência de várias ciências e tecnologias, IMEP-LAHC pode desempenhar um papel unificador para realizar projetos ambiciosos e enfrentar os desafios do futuro da eletrônica.

Essas atividades estão agrupadas em torno de três temas de pesquisa (semicondutores, telecomunicações, informática).

IMEP-LAHC também desenvolve colaborações com outros laboratórios do centro de pesquisa MINATEC, através de projetos científicos RTRA (Rede Temática de Pesquisa Avançada) para nanociência e nanoeletrônica. Regionalmente, o laboratório tem o apoio da Rhône-Alpes, no âmbito de projetos apoiados pelo núcleo de pesquisa Micro-Nano Eletrônica (DEM), permitindo-lhe reforçar a sua colaboração com a indústria na região, como a STMicroelectronics, SOITEC France Telecom, Schneider, Alcatel, Atmel, Freescale, TeemPhotonics.

IMEP-LAHC está envolvido em inúmeras colaborações de pesquisas, através de doutorados, mestrados, com as seguintes empresas: Agilent, Atmel, BEAMIND, CEPHYTEN, France Telecom, Freescale, geomobile, a IBM (EUA), MHS, MOTOROLA, RADIALL, Saint Gobain, Tecnologias SERMA, IOS, STMicroelectronics, Stantec, Texas Instruments, a Thales Alenia Space, Thales TRT, THALES TED TAS, THOMSON ...

Internacionalmente, o IMEP-LAHC coordena e participa em vários projetos europeus (IST, a ESA, colaborações bilaterais...) nos temas da ciência e da tecnologia da informação. Ele também desenvolveu várias colaborações bilaterais com países da Europa, África, Ásia e América sob a forma de co-orientação de teses, o intercâmbio de estagiários e pesquisadores.

3. Metodologia

No contexto global das comunicações sem fio, a tecnologia de identificação por radiofrequência (RFID) é uma das aplicações que, em curto espaço de tempo, mais se desenvolveu. Esta técnica surgiu na década de 1950, mas foi realmente conhecida no ano de 2000, com a sua aplicação em áreas cada vez mais diversificadas. Ela deve seu sucesso ao desenvolvimento de transponders de RFID a um custo muito baixo. Esta tecnologia tem mostrado muitas aplicações em diversas áreas e permitiu o retorno sobre oportunidade de investimento na indústria.

O RFID permite que se considere novos conceitos e novas possibilidades para os sistemas de rádio. Como exemplo, tomemos o sistema GPS. Ele não possui funcionamento em áreas internas (ambientes "indoor"). Um elemento chave para a ampla implantação de uma solução de monitoramento "indoor" é o seu custo; um sistema baseado em identificação por radiofrequência (RFID) é um bom candidato. Em outras aplicações ele é usado principalmente nas áreas de rastreamento e controle de acesso, mas também na telemetria.

Uma limitação desta tecnologia é que ela requer uma antena com alta diretividade, que ocupe o menor espaço possível e tenha uma boa largura de banda. Portanto, à partir dessas necessidades, neste estágio, foi proposto o desenvolvimento de diferentes tipos de antenas que possam satisfazer essas necessidades.

Durante este estágio, o trabalho foi realizado da seguinte forma:

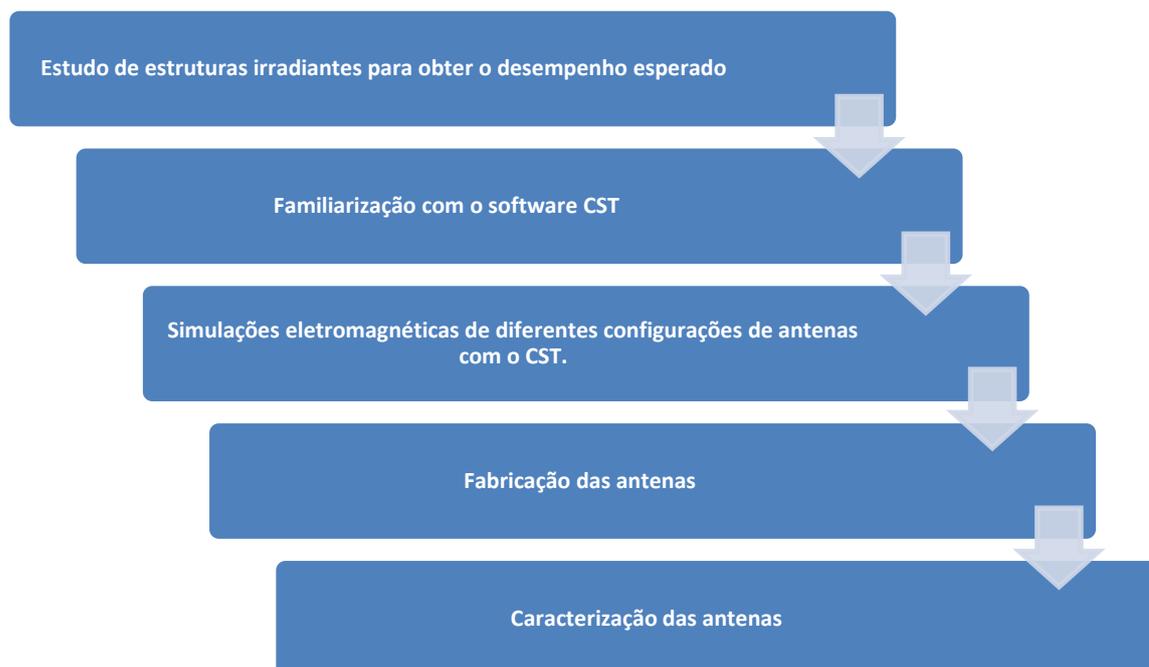


Figura 1: Metodologia do estagio

4. RFID

4.1. Introdução

Um sistema RFID é composto por dois tipos de elementos operacionais. A base, também chamado de leitor o qual emite ondas eletromagnéticas no espaço à “procura” de um ou mais receptores (etiqueta, tag), localizados a alguns centímetros ou a vários metros daquele. O receptor também chamado *tag*, etiqueta ou *transponder*, podem ser de dois tipos: passivo ou ativo. Este é constituído de um sistema de emissão/recepção, um microprocessador de processamento de dados e um espaço físico de armazenamento de até várias centenas de bits [15].

A diferenciação do modo ativo-passivo é definida a partir do modo de alimentação. As tags passivas não possuem alimentação própria/interna; a energia é fornecida pela onda enviada pelo leitor, através do fenômeno da indução eletromagnética. Um receptor ativo terá sua própria fonte de alimentação.

4.2. O que é uma etiqueta RFID?

4.2.1. A etiqueta

Como foi dito, podemos distinguir dois tipos de etiquetas RFID: passiva e ativa [16]:

- *Uma etiqueta passiva só funciona em modo leitura* (tais como código de barra). Uma antena colocada na *tag* captura certos sinais que fornecem energia suficiente para permitir a resposta da *tag*, enviando o código de identificação único da etiqueta (ID). Os dados, com uma capacidade de 32 a 128 bits, não são editáveis uma vez transcritos.

• A *etiqueta ativa* é alimentada por uma bateria plana e permite ler ou gravar dados. Elas têm uma memória maior do que as passivas com capacidade de até 10 Kbit. Elas também são fornecidas sem nenhuma informação gravada, mas podem ser escritos, apagados, alterados várias vezes.

4.2.2. Funcionamento

A tecnologia RFID utiliza frequências de rádio diferentes a partir de 135 kHz à 5,8 GHz (frequência usada por WiFi). De acordo com o comprimento de onda, a tecnologia RFID tem suas vantagens e desvantagens a ele inerentes a cada comprimento de onda, tais como a velocidade de transferência de dados, o alcance do sinal e a sua robustez ao ruído. Na tabela 1 temos as características para as frequências de operação da tecnologia RFID.

| Características/Frequências | 125 à 150 KHz | 13,56 MHz | 800 à 900 MHz | 2,45 GHz |
|---|---|---|---|---|
| Tipo de frequência | Baixa | alta | Banda UHF | Hyper |
| Tecnologia da antena | Bobina ou anel de ferrite (*) | Antena impressa, gravada, perfurada (**) | Antena impressa, gravada, perfurada (**) | Antena impressa ou gravada (***) |
| Distância entre as antenas emissora/receptora | > 1 m (**) | Europa e França : 1 m e volume 1 m ³ (**) USA > 0,8 m | Europa e França: no momento limitação de potência USA de 1 m à 10 m | França < 0,5 m (*) (> 1 m) USA > 1 m (***) |
| Velocidade teórica de transferência de dados | < 10 Kb/s (*) | < 100 Kb/s (**) | < 200 Kb/s (**) | < 200 Kb/s (***) |
| Influência do metal | Perturbação (*) (Espaço > 50 mm = 90 % Pref.) | Perturbação (*) (Espaço > 50 mm = 90 % Pref.) | Atenuação (**) (Espaço > 10 mm = 90 % Pref.) | Atenuação (**) (Espaço de 5 à 7 mm = 100 % Pref.) |
| Influência d'água | Nenhuma | Atenuação | Atenuação | Perturbação |
| Influência do corpo humano | Nenhuma | Atenuação | Atenuação | Perturbação |

Tabela 1 : características para as frequências de operação de RFID

(Fonte: ABC de la RFID, Décembre 2003, Jeanne Baylot) Performances : * ruim, ** boas, *** excelentes

4.2.3. Comparação entre RFID x Código de barra

Comparado com código de barras, a tecnologia RFID tem muitas vantagens:

- A leitura e escrita em tempo real (sem necessidade de proximidade entre o leitor e a etiqueta).
- A habilidade para identificar e distinguir vários objetos simultaneamente.
- Melhor resistência a agressões externas: algumas etiquetas são incluídas diretamente no produto.
- As aplicações de RFID antifurto.

- Em um ambiente com sensores, é possível rastrear e localizar os produtos, o que facilita o gerenciamento de estoque (redução do tempo de reação, o inventário em tempo real)

| Características | Código de barra | Código bidimensional | Etiqueta RFID |
|---|---|--|---|
| Capacidade (n° de caracteres) | 1 à 40 | 5 à 3000 | Alguns caracteres |
| Visibilidade da etiqueta | Indispensável | Indispensável | Dispensável |
| Distancia da leitura | 0 à 5 m (Dependendo da densidade do código de barra) | 15 cm à 1 m (Dependendo da densidade do código de barra) | alguns cm à um volume de 1m ³ |
| Segurança | Interna CRC | Diferentes níveis de criptografia CRC | Interna CRC |
| Leitura | SIM | SIM | SIM |
| Escrita | NÃO | NÃO | SIM (opção) |
| Vantagens | Vasta gama de vetores Linguagem universal Geração de reprodução simples / Baixa geração de custo | Grande capacidade Alta densidade Conceito de arquivo portátil Geração de reprodução simples / Baixa geração de custo | Leitura / gravação sem contato Proteção com senha Oportunidade para reescrita, Reciclagem do rótulo Suporta múltiplas páginas |
| Desvantagens | Etiqueta não regravável Limitada capacidade de armazenamento Não ler a olho nu | Etiqueta não regravável Leitor decodificador específico Não ler a olho nu | Maior custo Não ler a olho nu Necessidade de uma rotulagem clara |
| Custo (*) | 0,01 à 2 Euros | 0,01 à 2 Euros | 0,5 à 20 Euros |
| Sistemas periféricos (*) (leitura em posto fixo) | Leitores e decodificadores de 100 à 10 000 Euros | Leitores e decodificadores de 1 000 à 5 000 Euros | Antenas e decodificadores de 100 à 10 000 Euros |
| Entrada no terminal (*) (Móveis ou incorporados) | Terminais portáteis "Batch" de 300 à 5 000 Euros Transmissão radio freqüência de 1 500 à 7 500 Euros | Terminais portáteis "Batch" de 300 à 5 000 Euros Transmissão radio freqüência de 1 500 à 7 500 Euros | Terminais portáteis "Batch" de 300 à 5 000 Euros Transmissão radio freqüência de 1 500 à 7 500 Euros |
| Geração (*) | As impressoras a laser ou Transferência térmica 200-10 000 € | As impressoras a laser ou Transferência térmica 200-10 000 € | Idêntico ao sistema de leitura Fixo ou embutido |

Tabela 2 : características de códigos de barras e etiquetas RFID

(Fonte: ABC de la RFID, Décembre 2003, Jeanne Baylot) (*) Preço em Euros HT à título indicativo (2003)

4.2.4. Aplicações do RFID

Substituição de código de barras: RFID tem duas grandes vantagens sobre o código de barras: o identificador único e a capacidade de ler remotamente. Estas vantagens serão mais eficientes na

velocidade de identificação do produto. O conteúdo de um carrinho pode ser identificado de uma só vez. O comprador saberá a quantidade de suas compras sem ter de fazer fila no caixa. Na aplicação anti-roubo, com a integração dos chips dentro da embalagem ou do produto, a tentativa de roubo se torna quase impossível.

Localização e segurança de pessoas: uma sociedade desenvolveu para um parque de diversões, um sistema permanente de localização de pessoas por leitores RFID espalhados por toda a sua superfície. Esta técnica também é usada em algumas escolas nos EUA para garantir a frequência das aulas.

Controlando a câmara de frio: usando chip ativo, capaz de gravar algumas mudanças no ciclo de vida do produto ou a combinação com tintas sensíveis ao calor.

O aluguel e comodato de equipamentos: o identificador único garante que o equipamento é fornecido com o equipamento alugado.

O pagamento automático: EUA e França, os sistemas de pagamento já estão sendo usados por alguns postos de gasolina, pedágios ... aplicações que podem ser implantadas em estacionamentos, transportes públicos e determinados locais (casas noturnas, parques temáticos).

A identificação e rastreamento de pessoas e seres vivos: para facilitar o acesso aos dados médicos de um paciente, para monitorar um rebanho veterinário, monitoramento de árvores (doenças, ...).

Melhorar a logística de cada produto ter seu próprio identificador, gerenciamento de estoque é altamente automatizado e acelerado. Os dados de entrada e saída são automaticamente codificados para o sistema de computador que pode organizar a reposição junto aos fornecedores. Os resíduos podem também ser minimizados através de mensagens de aviso sobre os produtos a serem vendidos (e que o sistema de computador sabe a posição na loja), conforme a data-limite. O sistema também está sendo testado para o rastreamento de bagagem em alguns aeroportos.

Aplicações domésticas: sensores localizados na casa poderiam reconhecer seus habitantes e se adaptar a diferentes preferências.

Os militares e segurança: incluindo a identificação de pessoas não autorizadas em áreas controladas, monitoramento e rastreamento de vendas de armas, sistema de reconhecimento, de passagem ...

5. Geometria Fractal

Fractais foram definidos inicialmente por Benoît Mandelbrot, em 1975, como forma de classificar as estruturas cujas dimensões não eram inteiros. A geometria fractal fornece um padrão geométrico único que ocorre na natureza. Ele pode ser usado para descrever diferentes formas, por exemplo: plantas das árvores, terreno irregular, raio, alguns crustáceos, etc. Fractais são formas geométricas que podem ser encontrados na natureza (Figuras 2-8). Estas

geometrias foram geralmente classificadas como amorfo, mas Mandelbrot descobriu que algumas características especiais podem ser envolvidas.



Figura 2: Forma fractal de uma raio

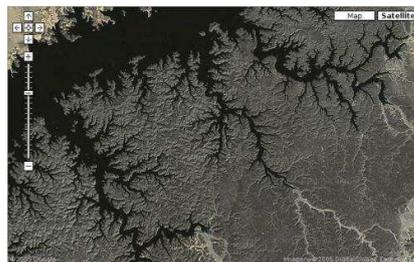


Figura 3: Forma fractal de um terreno



Figura 4: Forma fractal do romanesco



Figura 5: Forma fractal de uma folha



Figura 6: Forma fractal de uma planta



Figura 7: Forma fractal de um nautilus



Figura 8: Forma fractal de um pavão
(Fonte: <http://biologyblog.wordpress.com> ; <http://webcoist.com>)

Há muitas vantagens em usar a geometria fractal como ferramenta para o desenvolvimento de antenas, por exemplo:

- Redução do tamanho físico da antena
- Ter um comportamento multi-banda (“multiband”)
- O ganho e largura de banda podem ser otimizados

Tratando-se do uso da geometria fractal no desenvolvimento de antenas existem diversas geometrias que se mostraram úteis, a exemplo das Figuras 9-13:

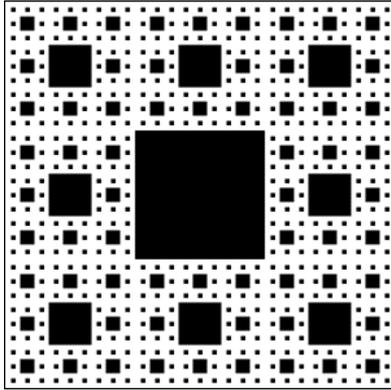


Figura 9: Sierpinski Carpet

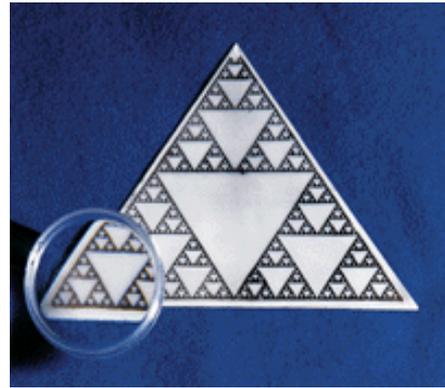


Figura 10: Sierpinski Gasket

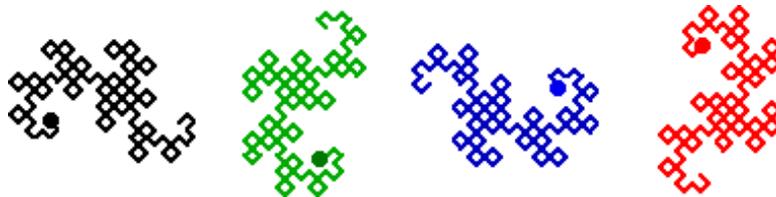


Figura 11: Heighway's Dragon

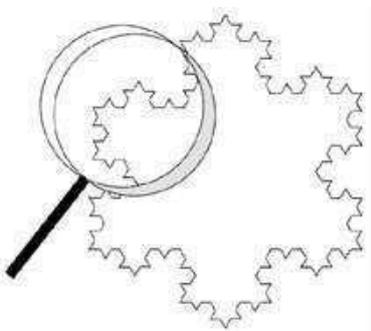


Figura 12: Koch Island - Snowflake.



Figura 13 : Durer's pentagons

5.1. Diminuição da frequência de ressonância:

Muito interessante característica no campo dos fractais é a possibilidade de ter frequências de ressonância menores, apenas pelo aumento do número de iterações (Figura 14).

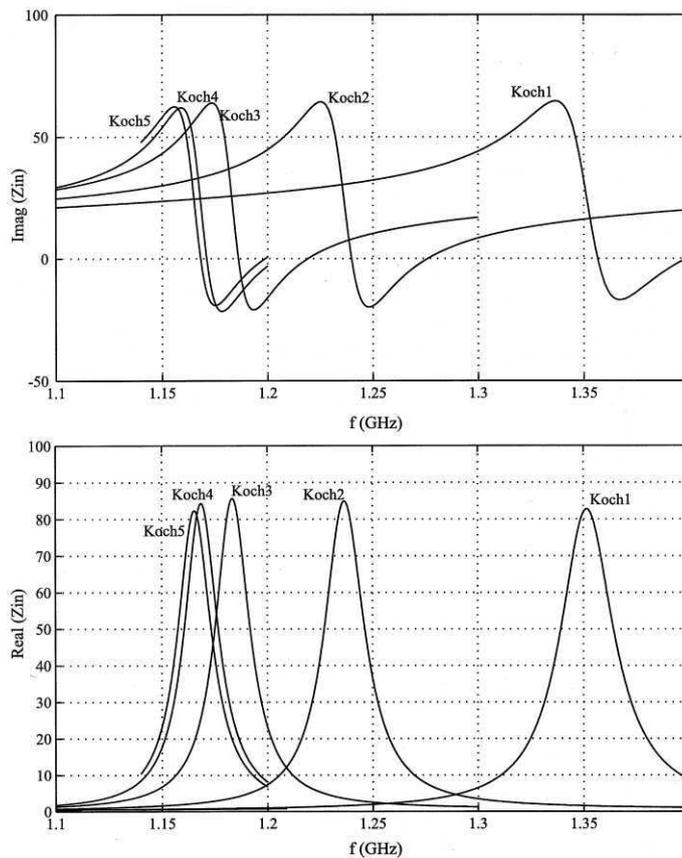


Figura 14: A evolução da impedância da antena Koch Fractal para várias iterações.

Na figura 14 observa-se a evolução da impedância para diferentes iterações da antena Koch fractal. A frequência de ressonância também diminui quando o número de iterações aumenta. Na quarta iteração, a frequência de ressonância é quase a mesma que na quinta iteração, esse comportamento é aceitável, pois quanto mais alta a iteração, menor será a diferença de frequência em relação à iteração anterior. De acordo com o gráfico, a frequência de ressonância do Koch5 pode ser reduzido por um fator de 1,17 em relação à iteração Koch1.

É interessante notar que, se existe uma antena circular ao redor da antena fractal, esta última apresenta uma menor frequência de ressonância [3]. Além disso, a região da Koch Island é 0,66 vezes menor que a área do círculo que ela engloba. Esta redução de área pode ser vantajosa quando é considerada a redução de custos e materiais envolvidos no projeto.

5.2. Diminuição da área da antena

Dependendo da geometria fractal adotada pode-se ter uma boa redução da área para a antena. Na verdade, a base dos fractais é a de adicionar ou remover partes da forma original a cada iteração. As antenas Sierpinski Gasket e Carpet apresentam uma redução da superfície significativa. Nas Figuras 15-18, os valores do volume de algumas iterações antena Sierpinski Gasket são estimados.

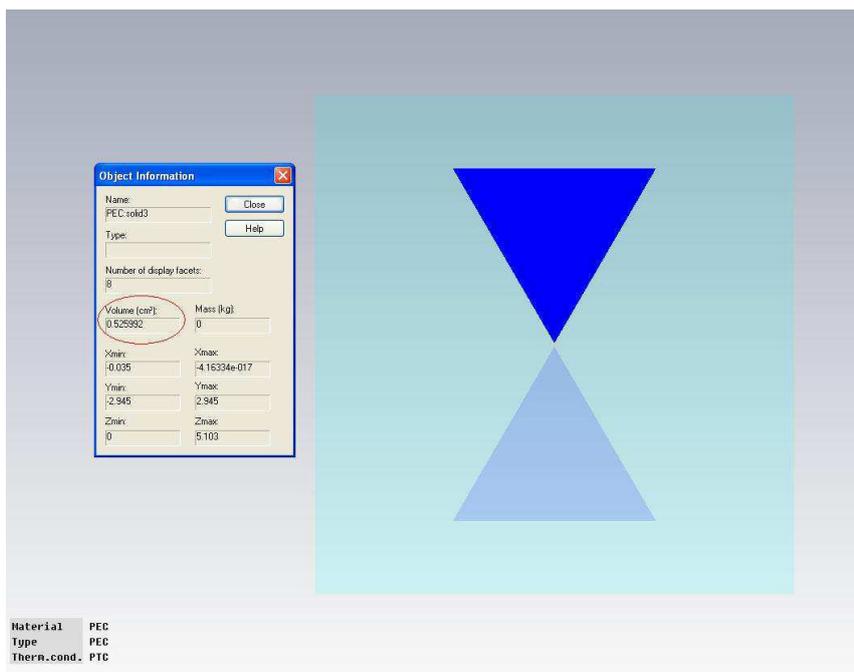


Figura 15: Volume sem iteração (iteração 0)

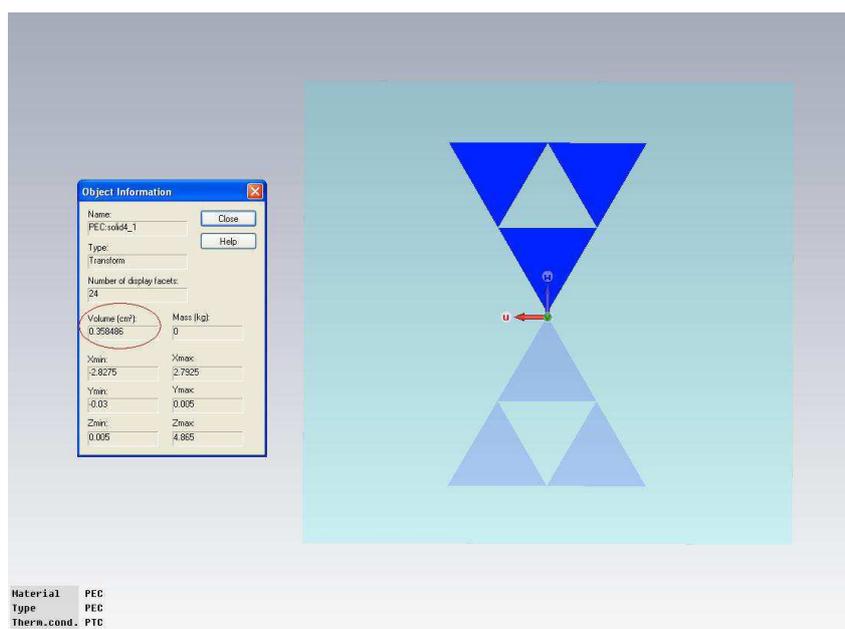


Figura 16: Volume da primeira iteração (iteração 1)

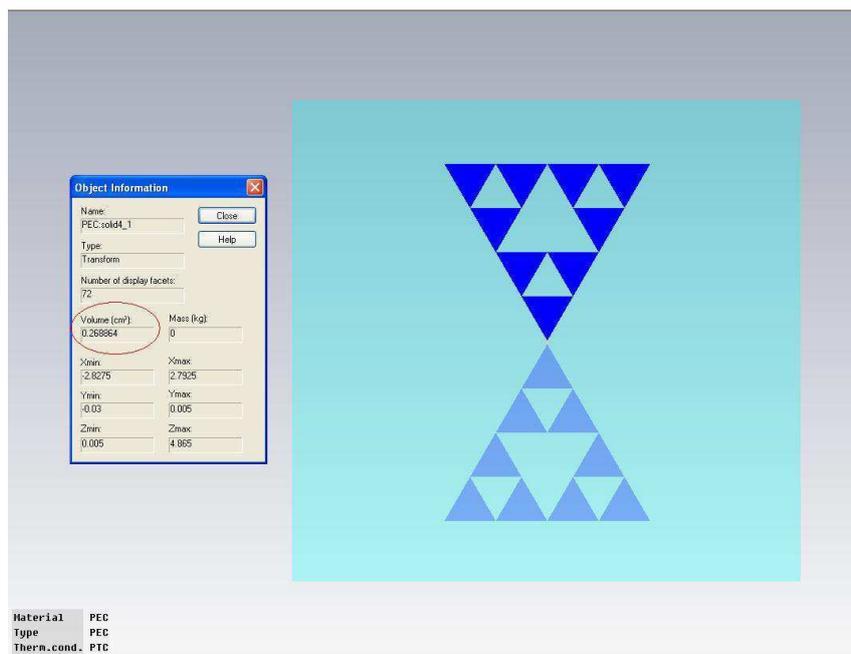


Figura 17: Volume da segunda iteração (iteração 2)

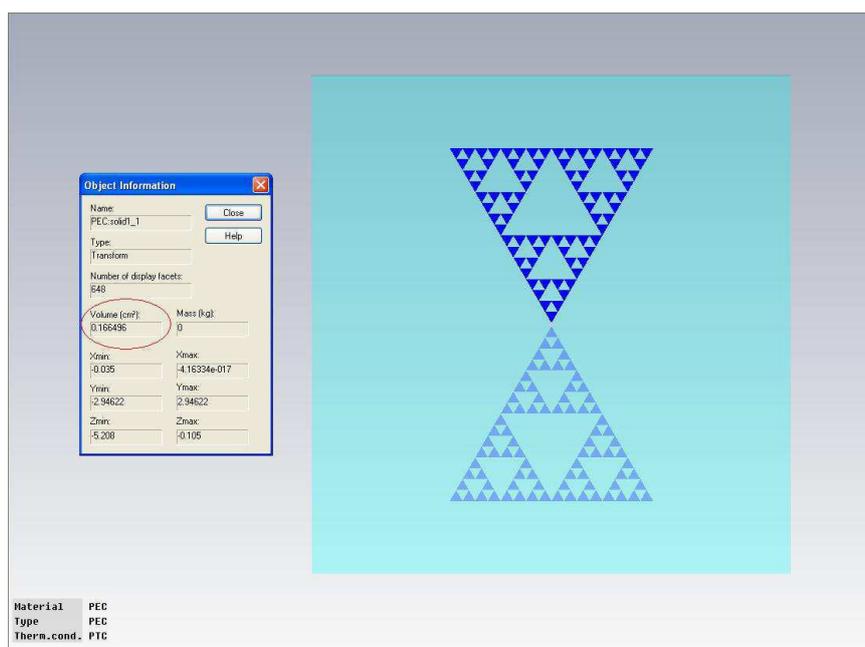


Figura 18: Volume da terceira iteração (iteração 3)

Segundo os números, a cada iteração da antena Sierpinski Gasket obtém-se uma redução interessante no volume do material usado para fazer a trilha. Na tabela 3, temos a comparação de cada iteração.

| Iteração | Volume (cm³) | Redução (%) |
|--------------------------|--------------------------------|--------------------|
| Sem fractal (Iteração 0) | 0.53 | ----- |
| Iteração 1 | 0.36 | 32.1% |

| | | |
|------------|------|--------|
| Iteração 2 | 0.27 | 25% |
| Iteração 3 | 0.17 | 37.04% |

Tabela 3 : comparação para diferentes iterações da geometria fractal

5.3. Múltiplas frequências de ressonância

Uma das características mais importantes da geometria fractal é que ela apresenta várias frequências de ressonância. Esta característica permite-nos usar a mesma antena para diferentes aplicações.

Dependendo da geometria adotada pode-se ter um bom espectro de frequência de ressonância. Na Figura 19, demonstra a quarta iteração da antena Koch Island e seus respectivos parâmetros S11.

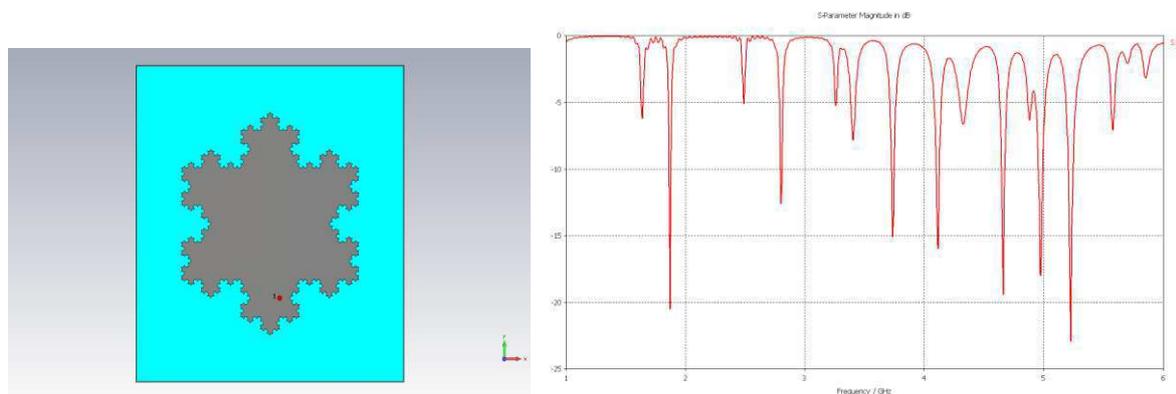


Figura 19 : Estrutura da quarta iteração da antena Koch Island com seu respectivo parâmetro S11.

A cada iteração podemos ter várias frequências de ressonância acrescidas. Nas Figuras 20-22, apresentamos a evolução das iterações para a antena de forma fractal Sierpinski Gasket.

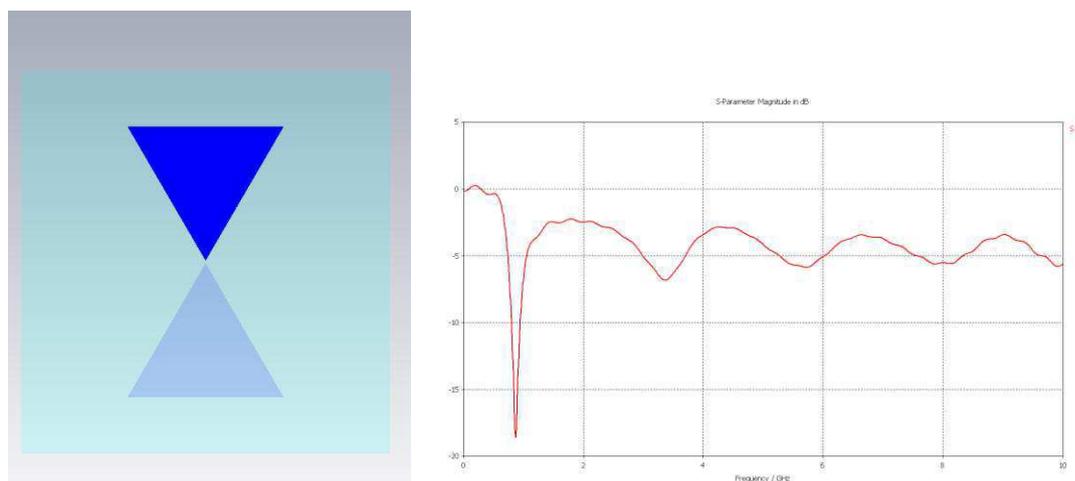


Figura 20: A antena dipolo Sierpinski Gasket (sem fractal) e seu parâmetro S11

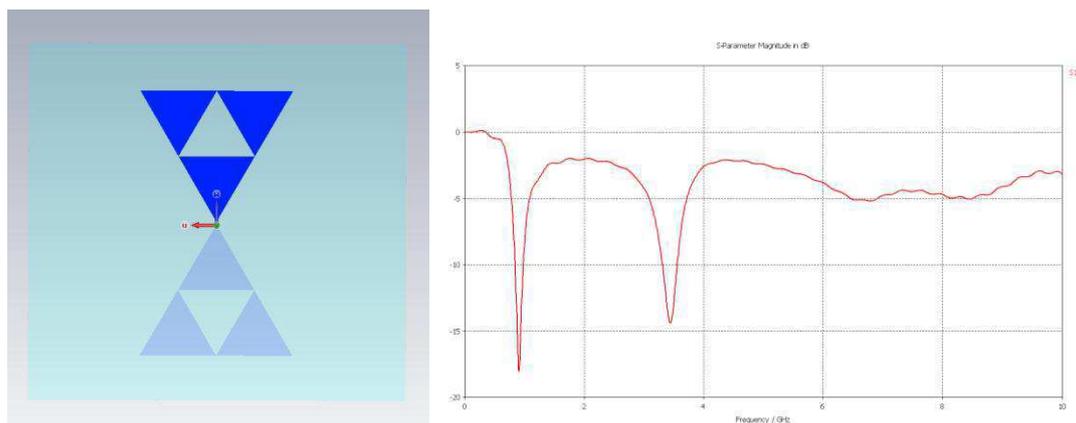


Figura 21: A antena dipolo Sierpinski Gasket 1ª iteração e seu parâmetro S11

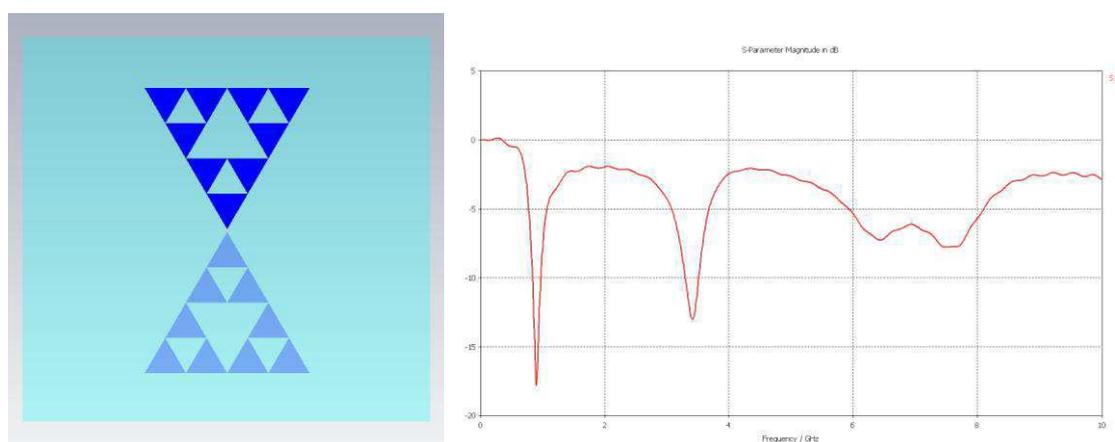


Figura 22 : A antena dipolo Sierpinski Gasket 2ª iteração e seu parâmetro S11

Como visto anteriormente, a passagem para a primeira iteração faz gerar uma frequência de ressonância perto de 3GHz. Na passagem para a segunda iteração (figura 22), entre 6GHz 8GHz algumas frequências de ressonância aparecem.

6. Projeto, simulação e medições das antenas

6.1. Sierpinski Gasket

Sierpinski Gasket é a geometria fractal mais amplamente estudada em aplicações para antenas. Sierpinski Gasket tem sido estudada extensivamente para configurações do tipo monopolo e dipolo. A distribuição fractal cria características multibanda. Antenas com esta geometria têm seu desempenho intimamente ligada à antenas convencionais Bow-tie, apresentando no entanto, algumas diferenças em suas características operacionais. Verificou-se que a natureza da antena multibanda pode ser transformada em uma característica de banda larga, utilizando um substrato dielétrico de alta constante dielétrica e materiais absorventes.

Assim, para esta antena foi escolhida a frequência de ressonância de 868MHz, que está enquadrada na faixa de UHF RFID para aplicações de monitoramento, e incluídos na faixa de 800 MHz a 900 MHz reservados para as aplicações RFID na França.

6.1.1. Design da Antena Sierpinski Gasket

Primeiro deve-se entender a formação da geometria de Sierpinski Gasket. Como em todas as formas fractais, começa-se a partir de uma estrutura simples (quadrado, triângulo, etc...) e adicionam-se pequenos pedaços de menor escala da forma original. O processo inicia com um triângulo equilátero $S(0)$. Divide-se em quatro pequenos triângulos equiláteros, usando os pontos médios dos três lados do triângulo original como um novo patamar. Retira-se a parte de dentro do triângulo central $S(1)$. Repete-se o processo em cada um dos restantes triângulos equiláteros $S(2)$. Este procedimento deve ser seguido para as próximas iterações ($S(3)$, $S(4)$...). Na Figura 23 a evolução das iterações de um monopolo Sierpinski Gasket é apresentada.

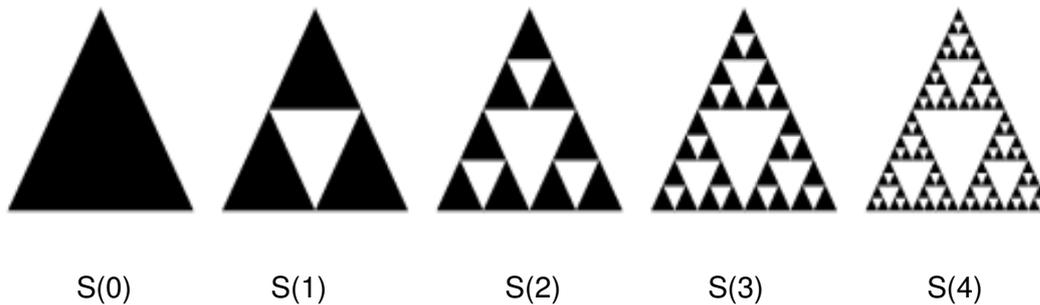


Figura 23 : evolução das iterações para um monopolo Sierpinski Gasket.

O método de construção da Sierpinski Gasket também pode ser feito à partir de equações matemáticas:

$$W \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} r * \cos(\theta) & -s * \cos(\varphi) \\ r * \sin(\theta) & s * \sin(\varphi) \end{bmatrix} * \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{pmatrix} \quad \text{Equação 1}$$

r e s são fatores de escala

φ e θ correspondem à rotações dos ângulos

X_0 e Y_0 são transformações mistas

W corresponde à matriz de transformação

Para cada iteração, temos as seguintes transformações (Equação 2):

$$\begin{aligned} W_1 \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} &= \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \\ W_2 \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} &= \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0.5 \\ 0 \end{pmatrix} \\ W_3 \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} &= \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0.25 \\ 0.433 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Equação 2

$$W(A) = W_1(A) \cup W_2(A) \cup W_3(A)$$

A origem do sistema de coordenadas foi escolhida no canto inferior esquerdo do triângulo (Figura 24). As transformações W1, W2, W3 são mostrados na Figura [24]. A geometria é obtida com a união dessas três transformações:

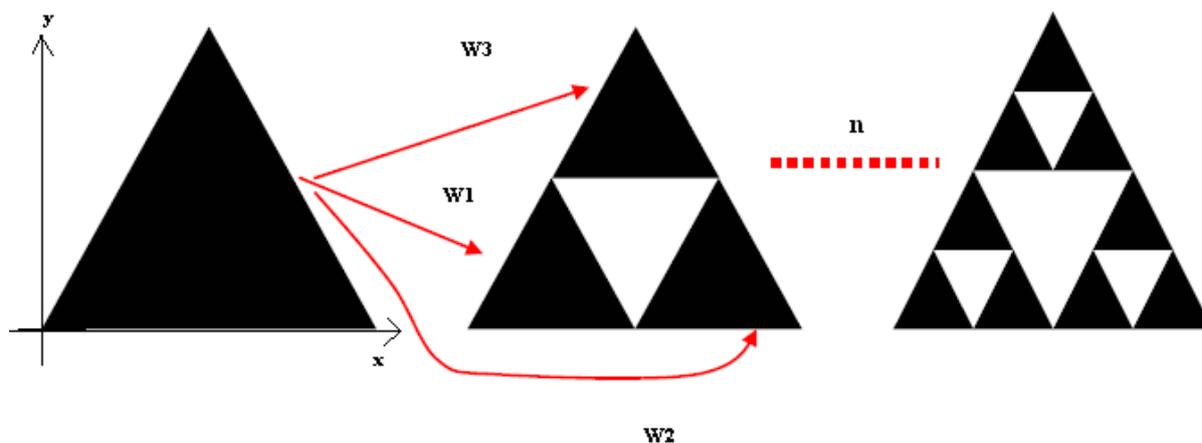


Figura 24: Iterated Function System(IFS) para a criação da geometria da Sierpinski Gasket

Este processo da criação da geometria é facilmente implementada em um computador, e é muitas vezes chamado de "multiple reduction copy machine" (MRCM). Na matemática, eles são referidos como "Iterated Functions Systems" (IFS).

Existem algumas fórmulas interessantes dentro da geometria fractal aplicada para as antenas:

$$N_n = 3^n \quad \text{Equação 3}$$

$$L_n = \left(\frac{1}{2}\right)^n \quad \text{Equação 4}$$

$$A_n = L_n^2 N_n \quad \text{Equação 5}$$

Onde :

N_n : O número de triângulos, após "n" iteração

L_n : O comprimento de um dos lados de um triângulo

A_n : A área parcial preta depois de "n" iteração

n : O número de iterações

6.1.2.Simulação da antena Yagi Sierpinski Gasket

Em nível de simulação, optou-se por trabalhar com o software CST MICROWAVE STUDIO®, o qual o laboratório IMEP-LAHC tem atualmente 12 licenças. A geometria fractal precisa de uma boa malha de simulação para obter um resultado positivo, pois, dependendo da estrutura fractal

adotada, há vários pedaços pequenos, difíceis de simular, logo o CST é muito útil para esta aplicação, pois pode-se “malhar” o sistema de modo mais apropriado para nossa aplicação. A maioria dos projetos de antena são fortemente relacionadas ao tamanho físico da antena. Fractais possuem comportamento auto-similar, como já foi estudado por Carles Puente [11] e apresentada no presente relatório, a altura de cada "sub-Gasket" vai determinar a frequência de ressonância da antena (Figura 25). Logo para a situação apresentada na figura a seguir, teremos 4 bandas diferentes, porque existem quatro diferentes alturas de Sub-Gasket.

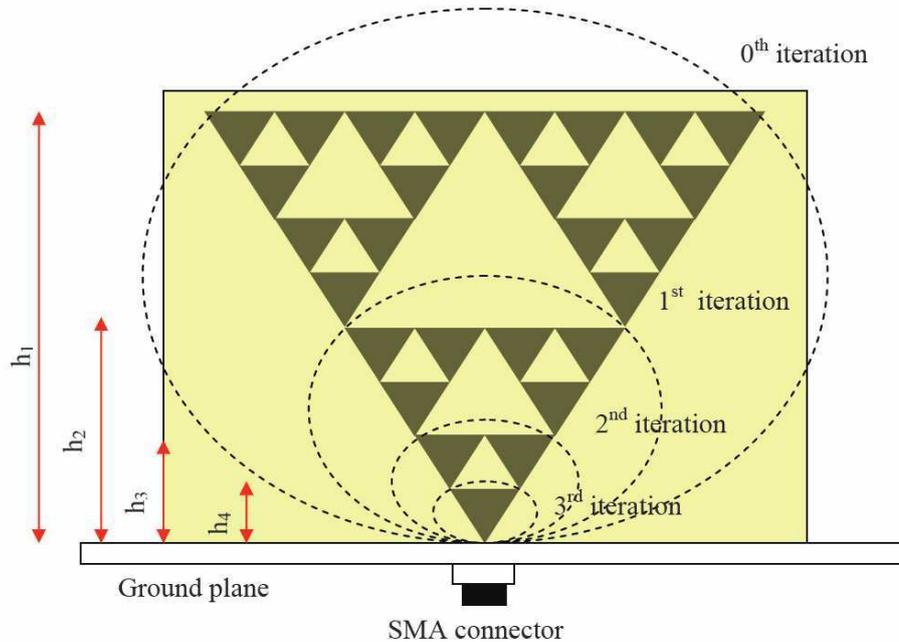


Figura 25: A altura de cada Sierpinski "Sub-Gasket"

O fator de proporcionalidade que determinará a altura de cada Gasket secundária é dado por:

$$\delta = \frac{h_n}{h_{n+1}} \quad \text{Equação 6}$$

Ao alterar o fator de proporcionalidade, teremos alturas diferentes para cada sub-Gasket, logo diferentes faixas de frequências. Assim, o cálculo da frequência de ressonância é:

$$fr = k \frac{c}{h} \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) (\delta)^n \quad \text{Equação 7}$$

Onde :

- k , constante dependente do tipo e espessura do substrato utilizado
- c , velocidade da luz
- h , altura do monopolo
- α , « flare angle », angulo de abertura do triângulo
- δ , fator de proporcionalidade
- n , número de iterações

Para projetar uma antena Sierpinski Gasket deve-se seguir o procedimento na tabela 4, o que implica determinar parâmetros específicos, como por exemplo: constante dielétrica do substrato, a frequência de operação, tamanho do substrato, ponto de excitação, número de iterações.



Tabela 4 : o processo de concepção do monopolo Sierpinski Gasket

Como o objetivo do projeto era conseguir uma antena diretiva e de banda larga, foram usados vários mecanismos para atingir o objetivo. Com base nas referências bibliográficas, verificou-se que para antenas Sierpinski Gasket haveria uma estrutura a qual poderíamos usá-la para obter bons resultados para o nosso projeto, esta estrutura é similar à antena Yagi, mas com geometria fractal. Neste projeto, o substrato usado é o "FR4". Escolheu-se este substrato, pois, além de ser mais barato no mercado, havia boa disponibilidade no laboratório. O FR4 também pode operar até 10 GHz. A espessura do dielétrico disponível é de 0.8 mm ou 1.6 mm, com uma tangente de perda de 0.025. A Tabela 5 mostra as especificações do substrato FR4.

| PARÂMETRO | VALOR |
|---------------------------------|----------------|
| Permissividade (ϵ) | 4.9 |
| Tangente de perdas (δ) | 0.025 |
| Condutividade térmica | 0.3 [W/ K / m] |
| Espessura do substrato | 0.8mm |

| | |
|-----------------------------|--------|
| Frequência mais alta aceita | <10GHz |
|-----------------------------|--------|

Tabela 5: especificações substrato FR4

Primeiro foi desenhado o dipolo Sierpinski Gasket. Na Tabela 6 estão expostos os parâmetros geométricos do dipolo.

| PARÂMETRO | VALOR |
|--------------------------------------|-------|
| Iteração, n | 4 |
| Altura do triângulo, h | 4.9cm |
| “Flare angle”, α | 60° |
| Fator de proporcionalidade, δ | 0.5 |

Tabela 6 : parâmetros geométricos do dipolo

A frequência de operação de 868 MHz foi escolhida para este dipolo, logo se obtém o seguinte dipolo (Figura 26).

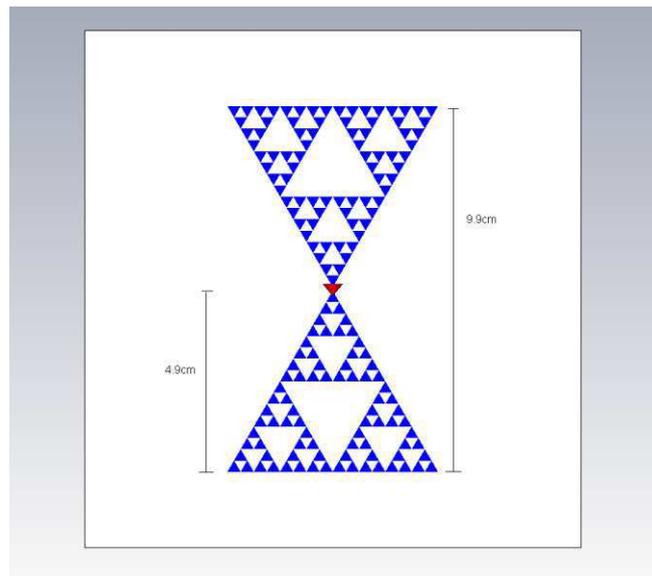


Figura 26 : Dipolo Sierpinski Gasket

Normalmente a diretividade que se pode ter para um dipolo é 1.6dB (Figura 28), mesmo com um dipolo fractal, não se conseguiu uma diretividade maior.

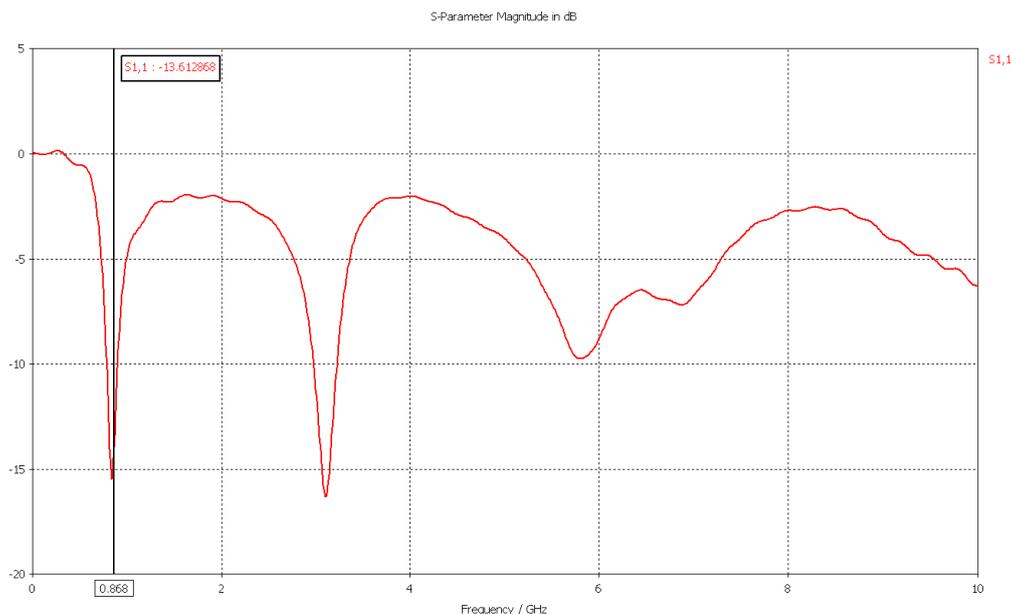


Figura 27: Parâmetros S11 - Dipolo Sierpinski Gasket

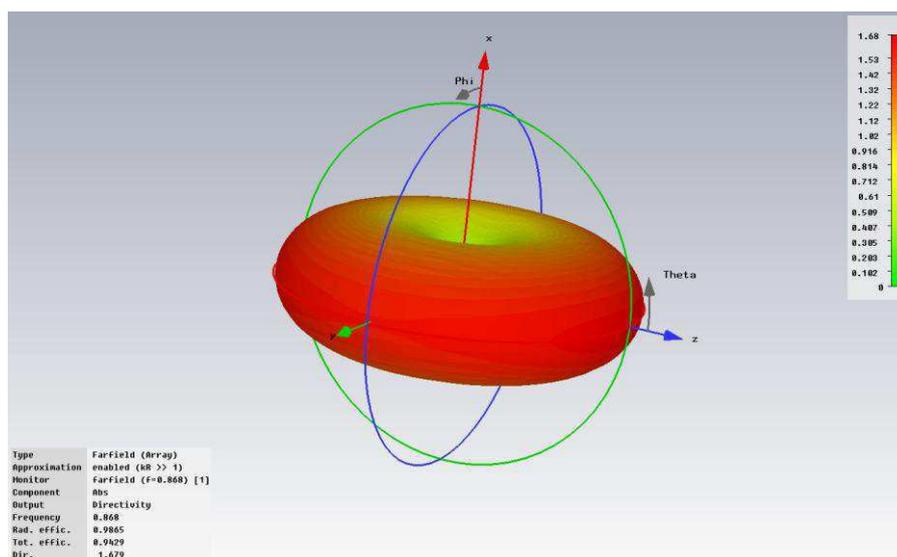


Figura 28: Diagrama de irradiação - Dipolo Sierpinski Gasket

A principal alteração que se pode obter com o dipolo fractal é a redução do tamanho da antena, conseqüentemente reduz-se a quantidade de material utilizado para a fabricação do dipolo (ver seção 4.3 - Por que usar antena fractal).

Como a aplicação demanda uma alta diretividade, acresceu-se ao dipolo um plano metálico refletor e um diretor. O uso desses diretores faz parte de uma técnica com base na literatura que mostra que ao empilhar camadas de estruturas periódicas (diretor), acima da antena microstrip tradicional pode-se aumentar a diretividade e largura de banda da antena para uma ou duas bandas de frequência; esta técnica é chamada de “superstrate”. No entanto, a fim de ter um bom uso do diretor, tem-se que

projetar a distância correta entre o diretor e a fonte. Para distâncias entre a antena e o diretor em torno de $\lambda/2$, aumenta-se a diretividade e para distâncias em torno de $\lambda/10$, a banda passante da antena irá aumentar. Logo, primeiramente variou-se a distância entre a antena e o diretor para localizar qual era a melhor configuração para obter uma boa diretividade e uma boa adaptação da antena.

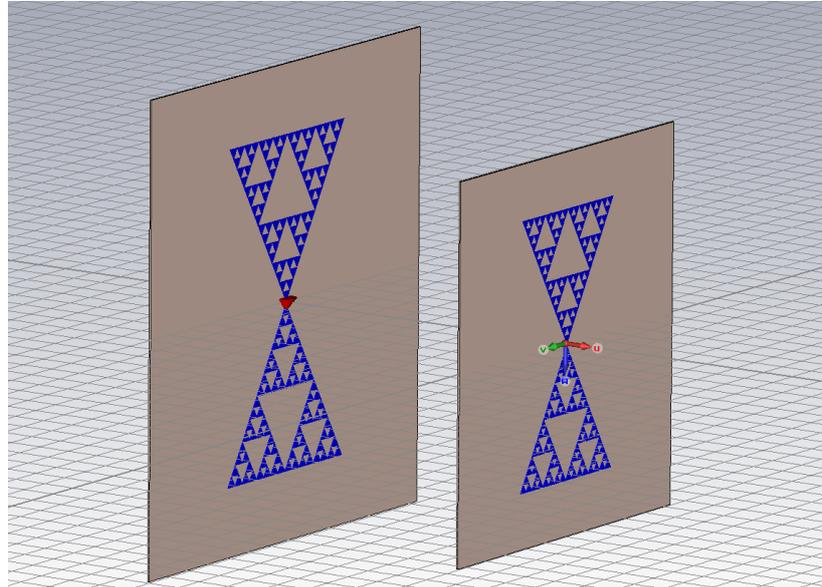


Figura 29: Configuração antena Sierpinski Gasket com diretores

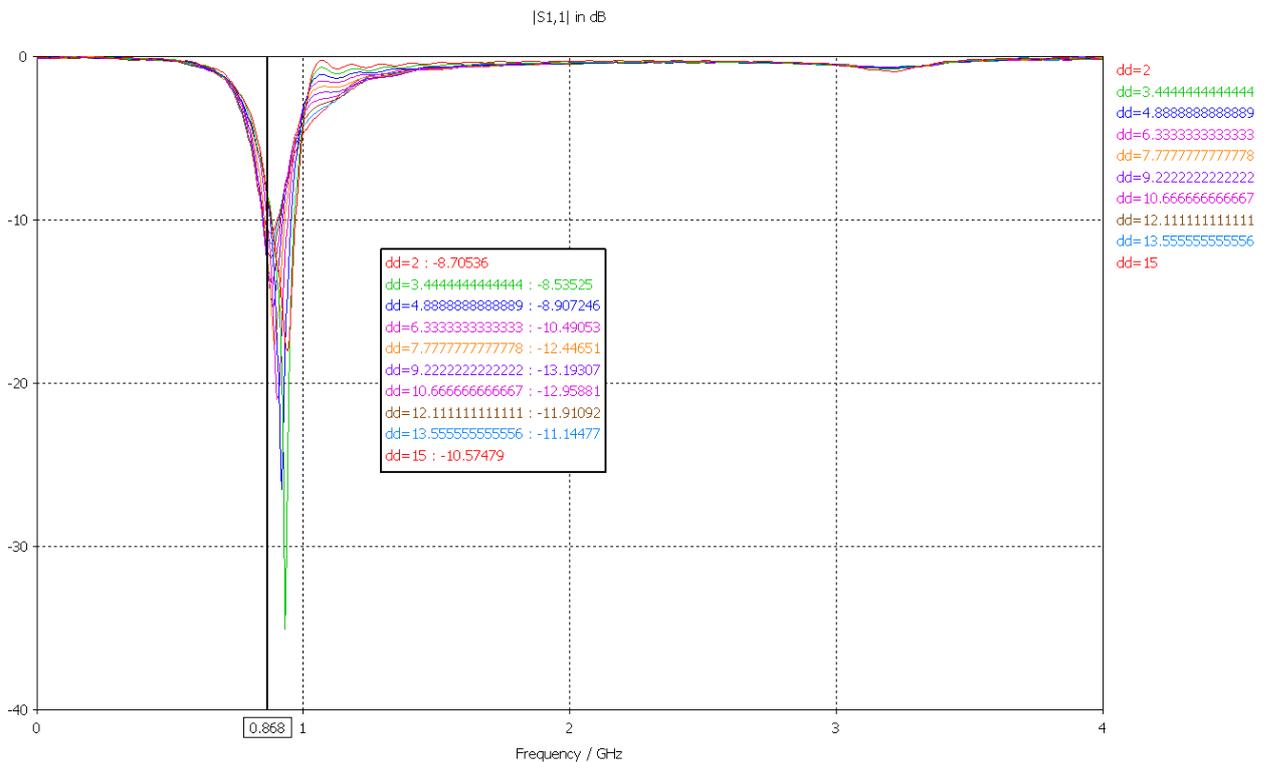


Figura 30: Variando a distância entre a antena e o diretor (variável dd = distância entre a antena e o diretor)

Verificou-se que a melhor configuração para uma boa adaptação da antena, é uma distância de 10 cm ($\lambda/3$) entre a antena e o diretor (Figura 30). Depois de definida a distância adequada entre a

antena e o diretor, procurou-se variar a escala física do diretor em relação à antena, para verificar qual o tamanho mais adequado para nossa aplicação. Dois parâmetros foram analisados para esta etapa: a diretividade (Figura 31) e os parâmetros S11 (Figura 32).

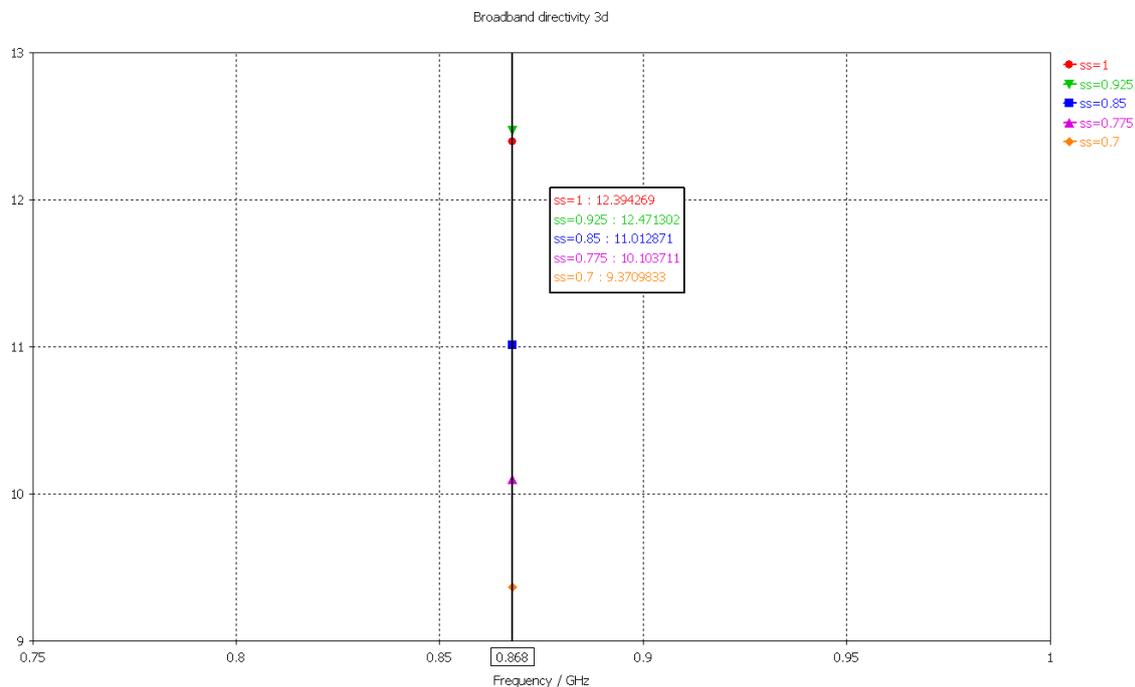


Figura 31: Diretividade para as diferentes escalas físicas do diretor (Variável "ss" = escala física do diretor)

A partir da Figura 31, observa-se que para diferentes valores da escala física do diretor, pode-se ampliar significativamente a diretividade.

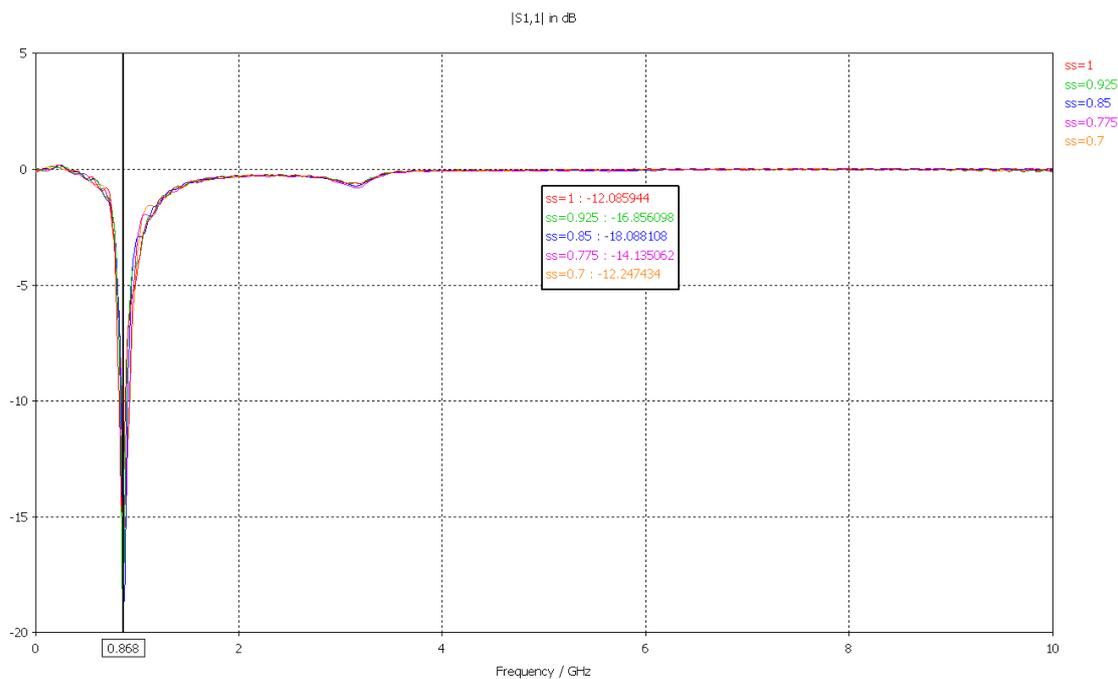


Figura 32: S11 para as diferentes escalas físicas do diretor (Variável "ss" = escala física do diretor).

Na Figura 32, tem-se o comportamento dos parâmetros S11 para diferentes valores de escalas físicas do diretor.

Após análise dos resultados das simulações, foi possível a escolha de um valor que era ao mesmo tempo apropriado para a diretividade como também para a adaptação da antena (parâmetro S11). O valor $ss = 0.88$ foi selecionado. A partir destas simulações, pode-se mostrar que a aplicação da técnica “superstrate” permite expandir a diretividade da antena (Tabela 7).

| Configuração | Diretividade (dB) |
|--|--------------------------|
| Dipolo Sierpinski Gasket | 1.6 |
| Dipolo Sierpinski Gasket com diretores | 12.5 |

Tabela 7: Comparação da diretividade para diferentes técnicas empregadas

Buscando sempre o aumento da diretividade, outra técnica bem conhecida no domínio das antenas foi usada para ampliar a diretividade; um plano refletor metálico foi inserido na estrutura (Figura 33). No entanto a inserção deste novo componente deveria ser realizada de forma cautelosa para não desadaptar a antena, portanto variou-se a distância entre a antena e o refletor metálico buscando o menor valor onde se teria uma boa adaptação da antena. (Figura 34).

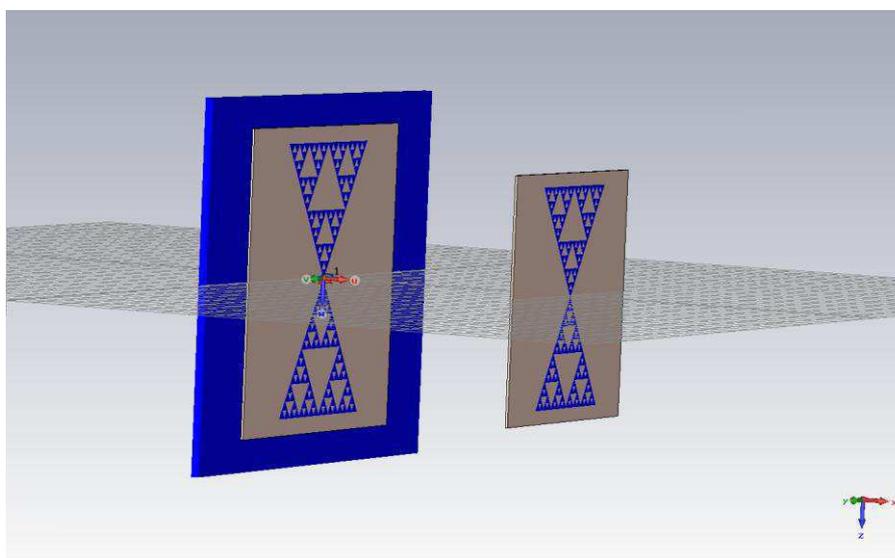


Figura 33: estrutura acrescida de um plano refletor metálico

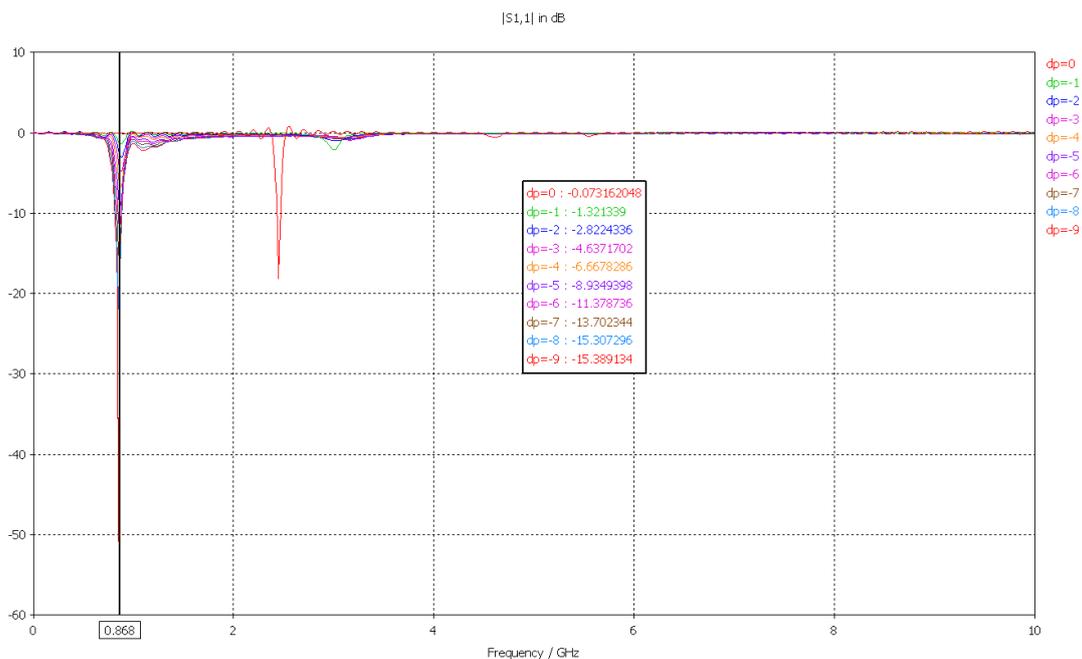


Figura 34: Parâmetro S11 variando-se a distância entre a antena e o plano refletor. (“Dp” = distância variável entre a antena e o plano refletor metálico)

Após análise dos resultados, observa-se que a distância de 7 cm ($\lambda/5$) entre a antena e o plano refletor apresentava-se como um bom resultado em nível de adaptação da antena. Para completar o estudo com a configuração Yagi Sierpinski Gasket, buscando aumentar a diretividade, um arranjo de duas antenas foi projetado (Figura 35), com um espaçamento de 15 cm ($\lambda/2$) entre as duas antenas na direção do eixo Y. Com esta nova configuração, obteve-se um ótimo desempenho para a antena, sobretudo em termos de ganho e diretividade, conforme disposto na Tabela 8.

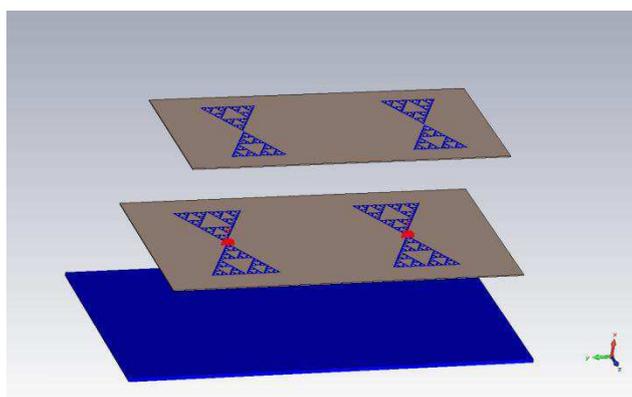


Figura 35: Arranjo de duas antenas Yagi Sierpinski Gasket

| Parâmetro | Valor |
|---------------------------------|----------|
| Frequência de ressonância (MHz) | 868 MHz |
| S11 (dB) | -19.44dB |

| | |
|-------------------|-----------|
| Diretividade (dB) | 47.91 |
| Banda passante | 62.12 MHz |

Tabela 8: Resultados da Simulação: Arranjo Yagi Sierpinski Gasket

Nas Figuras 36-38, temos os parâmetros simulados dos coeficientes de reflexões S11, diretividade e largura de banda.

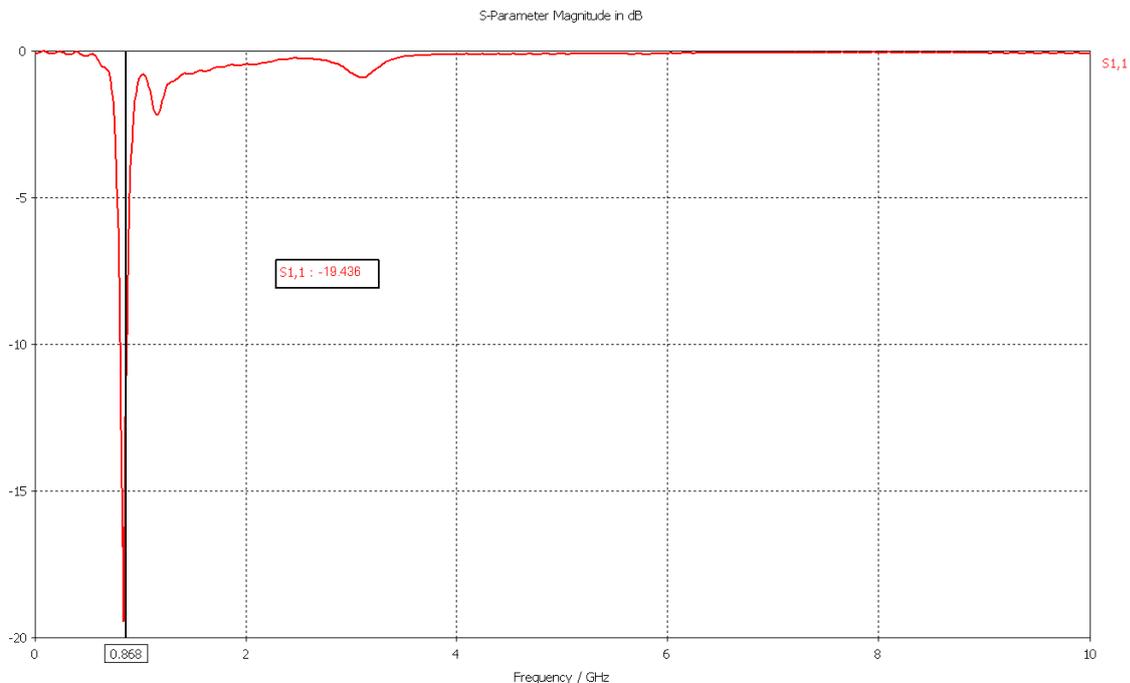


Figura 36: Parâmetros S11 da antena Yagi Sierpinski Gasket

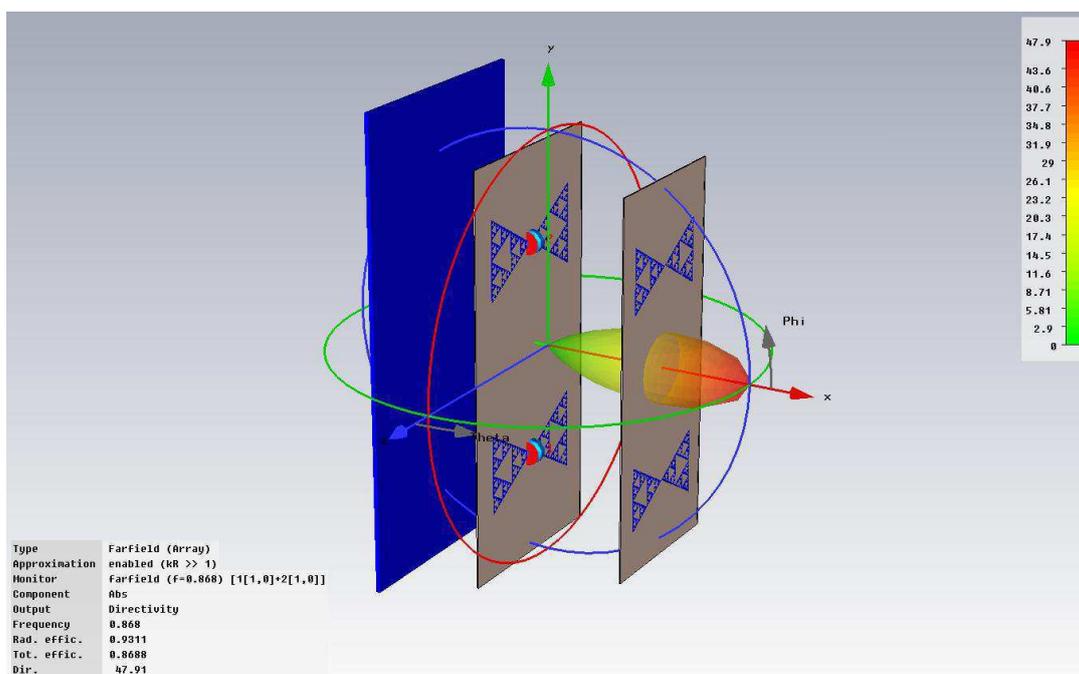


Figura 37: Diretividade da antena Yagi Sierpinski Gasket

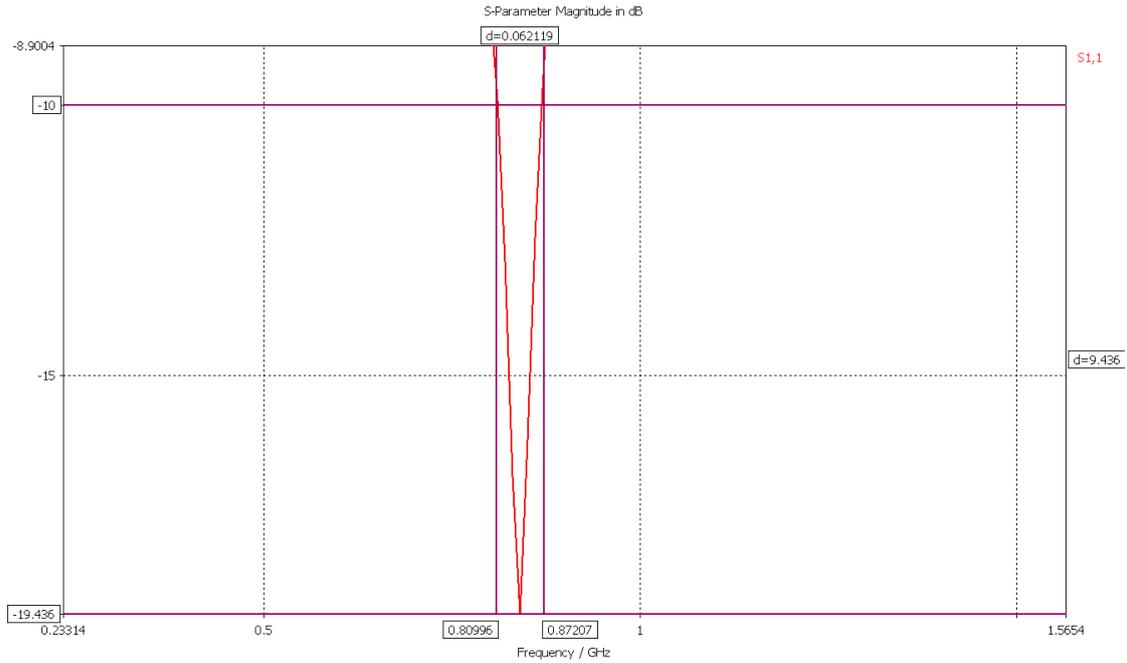


Figura 38: Banda passante da antena Yagi Sierpinski Gasket

6.1.3. Implementação física: Antena Yagi Sierpinski Gasket

O desenvolvimento da antena foi realizado no software CST®. A partir deste software um arquivo “dxf” foi criado para o processo de fabricação do circuito impresso da antena. Como esta estrutura era um pouco diferente, alguns elementos foram necessários para a sua montagem desta estrutura (Fig. 39): um divisor de potência para garantir que o mesmo sinal (mesmo módulo e fase) chegue às duas antenas do arranjo, cabos coaxiais para realizar a ligação entre o divisor e as antenas.

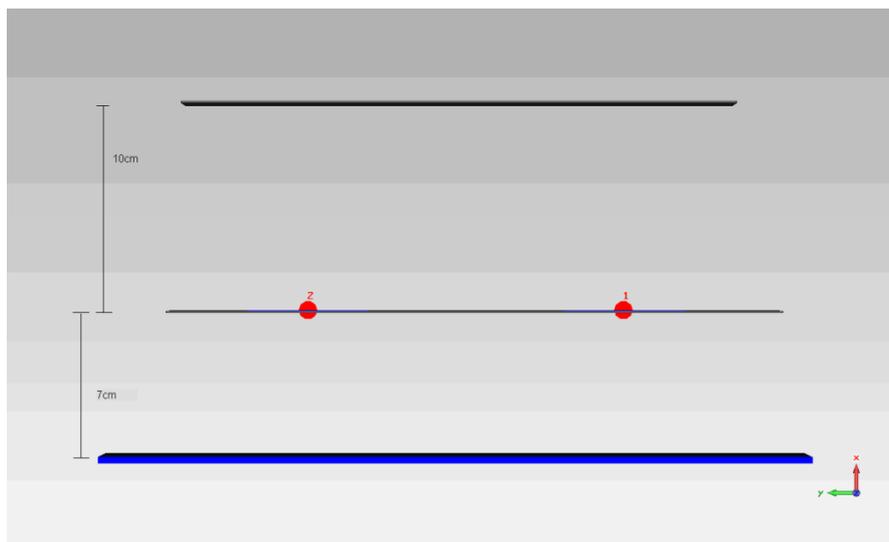


Figura 39: Espaçamento entre as diversas camadas da estrutura da antena

Na Tabela 9, tem-se uma lista de todos os materiais que foram usados para a implementação física da antena Yagi Sierpinski Gasket.

| Material | Função | Quantidade |
|-----------------------|----------------|----------------------------------|
| Parafusos de plástico | Fixação | 12x5cm 4x2cm |
| roscas | Fixação | 4 |
| Conectores | Alimentação | 3 fêmeas |
| Cabo coaxial | Alimentação | 1 (40cm) |
| Placa metálica | Plano de terra | 1 (30cmx 16cm) |
| Substrato | | 1(23cm X 13cm) 1(23cm x 10cm) |

Tabela 9: materiais usados para fazer a execução física da antena Yagi Sierpinski Gasket.

Primeiramente foram feitos os furos no circuito impresso para permitir a montagem da estrutura. Em seguida, os cabos coaxiais foram cortados do mesmo tamanho (20 cm), estes cabos foram utilizados para a ligação entre o divisor e as antenas. Posteriormente, foi realizada a soldagem do cabo coaxial na antena e, portanto, os conectores foram colocados. Nas Figuras 40-42, temos as fotos do protótipo final.

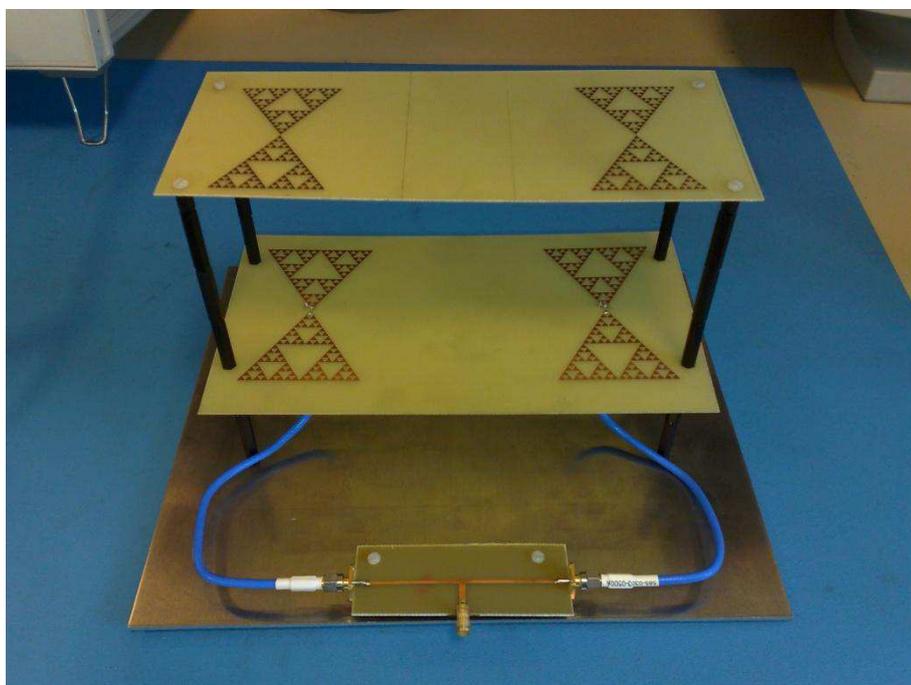


Figura 40: vista frontal do protótipo final

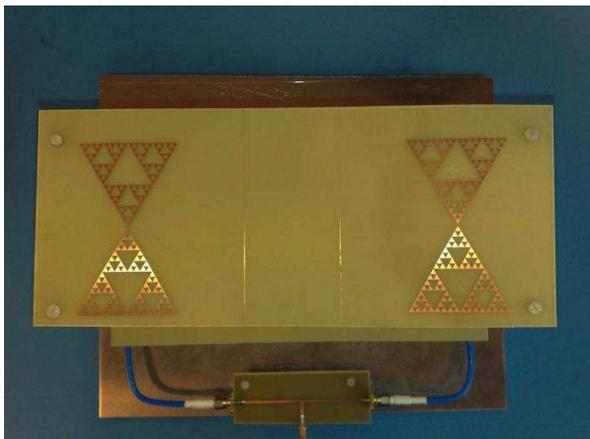


Figura 41: Vista superior



Figura 42: Vista em perspectiva

6.1.4. Medições da antena Yagi Sierpinski Gasket

As medições dos parâmetros da antena foram realizadas (Figura 43) na sala das manipulações do laboratório IMEP-LAHC. Eles foram coletados através do VNA, Analisador de Rede 8510 - HP (Figura 43).



Figura 43: Medição dos parâmetros da antena Yagi Sierpinski Gasket com o VNA

Nas figuras 44 e 45, tem-se o resultado das medições dos parâmetros S11.

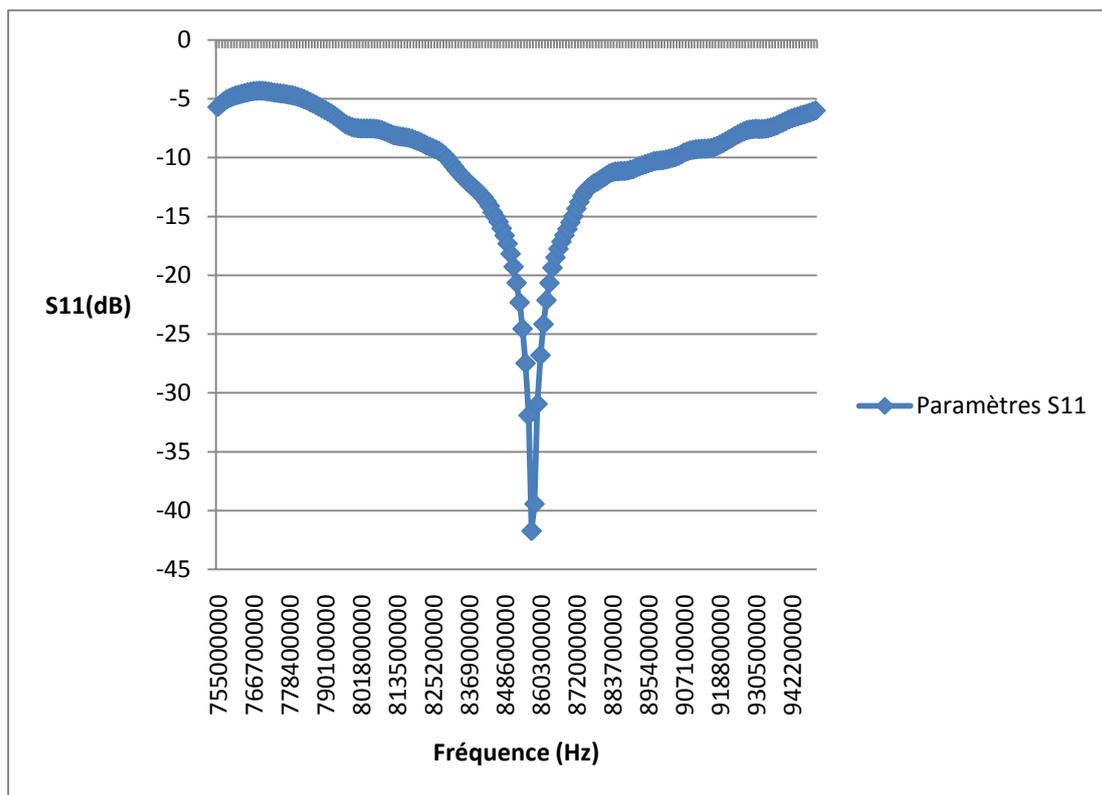


Figura 44: Medições dos parâmetros S11(755 MHz à 950 MHz) - Antena Yagi Sierpinski Gasket

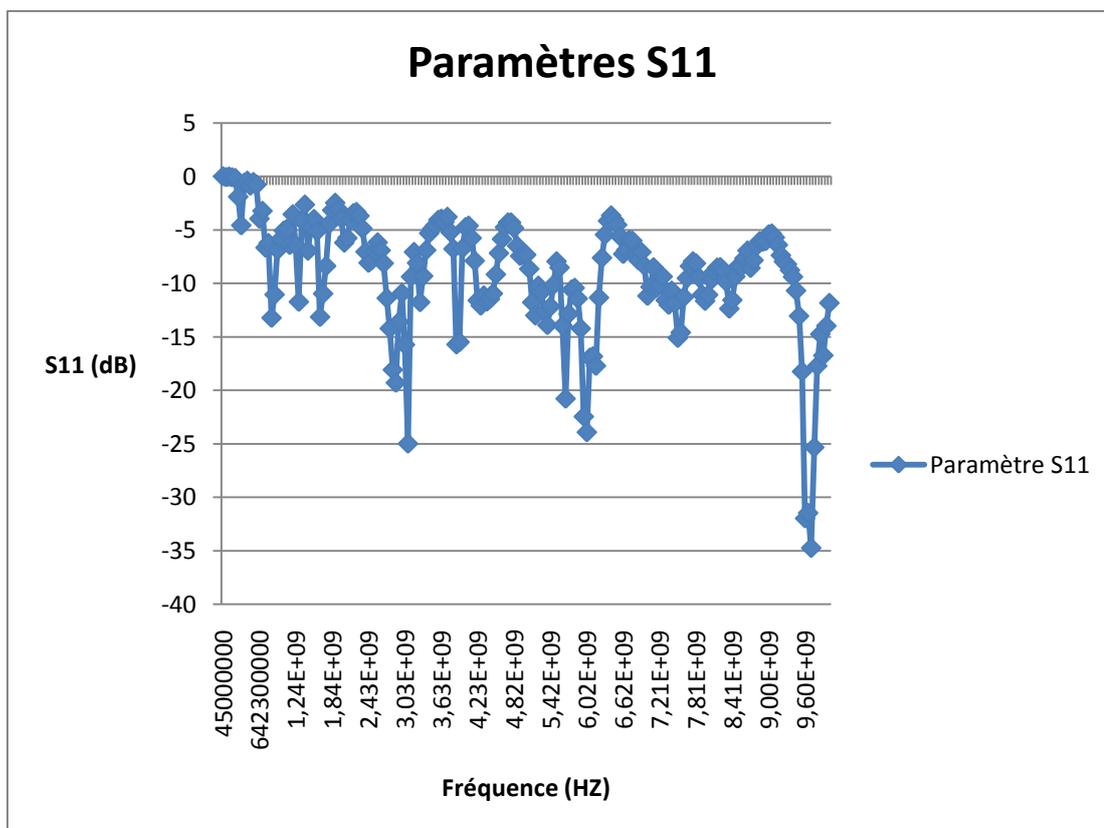


Figura 45: Medições dos parâmetros S11(0 GHz à 10GHz) - Antena Yagi Sierpinski Gasket

6.1.5. Comparação de resultados

Na tabela 10 tem-se a comparação dos resultados entre a simulação feita com o software CST e as medições com o VNA.

| <i>Parâmetro</i> | <i>Valor teórico</i> | <i>Valor medido</i> |
|---------------------------|----------------------|---------------------|
| S11 (freq=868 MHz) | -19 | -16 dB |
| Banda passante | 62 MHz | 76 Mhz |
| Diretividade | 47.91 | ---- |

Tabela 10 : comparação de resultados entre a simulação foi feita com o software CST e as medições com o VNA

Em geral, os resultados das medições mostraram boa consistência com as simulações. Pode-se observar que o valor medido do parâmetro S11 apresenta uma pequena discrepância em relação ao valor simulado. No entanto, estas diferenças entre os resultados devem-se as seguintes razões:

- A inserção do divisor de potência
- As diferenças de tamanho físico entre o protótipo da simulação e o protótipo físico
- Os conectores são pontos de descontinuidade e perda

6.2. Koch Island (Snowflake)

A fractal "Koch Island" ou "flocos de neve" foi primeiramente descrita por Helge von Koch em 1904. Esta forma geométrica fractal é construída a partir de um triângulo equilátero, adicionando-se pequenos triângulos equiláteros em cada uma das arestas do triângulo original e, em seguida, repete-se o mesmo processo a cada iteração.

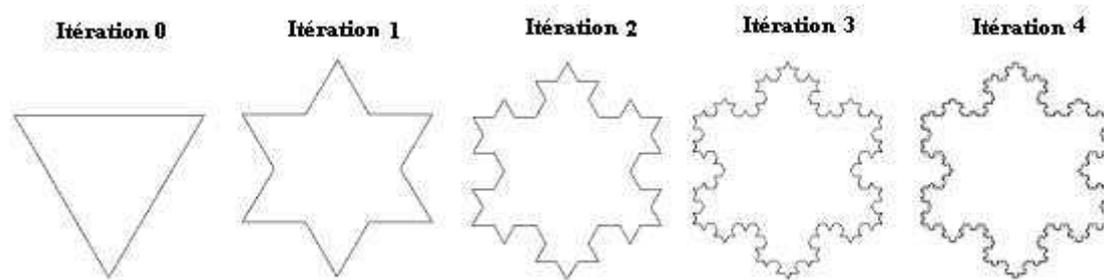


Figura 46 : evolução das iterações da antena Koch Island

6.2.1. Concepção da antena Koch Island

Como todas as geometrias fractais, o ponto de partida para a construção destas formas exóticas é normalmente uma forma simples (triângulo, círculo, quadrado, etc). Logo a forma inicial da Koch Island é um triângulo, um triângulo equilátero T (Figura 47). Para a primeira iteração, reduz-se o triângulo T à uma escala de 1/3 e realiza-se 3 cópias para serem colocadas juntas a cada um dos três lados do triângulo original, conforme mostrado no diagrama abaixo K(1). A segunda iteração, reduz-se

o triângulo T à uma escala de $1/9 = (1/3)^2$ e coloca-se $12 = 4 \cdot 3$ cópias ao longo dos lados de $K(1)$, resultando-se na forma $K(2)$. Para a terceira iteração, leva-se $48 = 4 \cdot 12$ cópias de T em escalas de $1/27 = (1/3)^3$ colocando-as nos lados de $K(2)$ para se obter a forma $K(3)$. A cada iteração o procedimento é repetido.

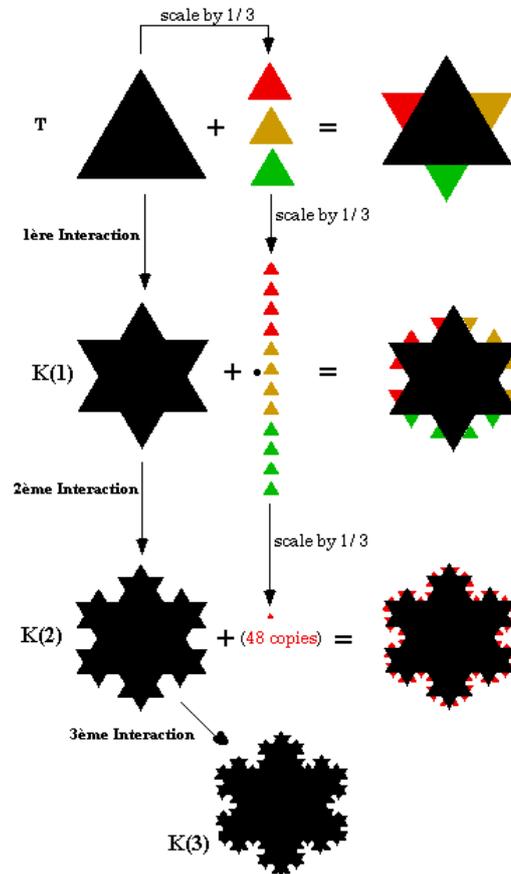


Figura 47 : Procedimento para a construção da forma geométrica Koch Island

A figura 47 apresenta a fractal « Koch Island » em diferentes etapas das iterações. A cada nova iteração « k » a área da antena aumenta. Para cada iteração k a área A_k da fractal pode ser calculada por:

$$A_{k+1} = A_k + \frac{\sqrt{3}}{12} \left(\frac{4}{9}\right)^{k-1} \cdot a^2 \tag{Equação 8}$$

Onde a é o lado do triângulo inicial que possui uma área $A_0 = \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot a^2$; A série geométrica da equação 8 converge à:

$$A = \frac{2}{5} \sqrt{3} \cdot a^2 \tag{Equação 9}$$

Todas as iterações são circundadas ao interior de uma circunferência de raio $r = \frac{\sqrt{3}}{3} a$. No entanto, o perímetro aumenta a cada nova iteração. O perímetro total para uma iteração k é calculado por:

$$l_k = 3a \left(\frac{4}{3}\right)^k \tag{Equação 10}$$

Portanto a geometria fractal permite ter-se um perímetro infinito delimitando uma área finita. No entanto, para a execução, essa estrutura não é óbvia a ser realizada, pois a definição de pontos da malha deve ser infinita devido ao perímetro infinito.

A antena Koch Island tem uma característica muito interessante, os modos de propagação eletromagnética são facilmente localizados. Uma vez que esses padrões são descobertos, pode-se ter uma boa diretividade.

Encontrar um "modo localizado" significa que a distribuição da corrente elétrica é predominantemente localizada perto das bordas da antena, isso significa que existe uma grande chance que a antena apresente um comportamento do diagrama de irradiação altamente diretivo.

6.2.2. Simulação da antena Koch Island

Na literatura, vimos em [1] [2], as leis de formação da antena Koch fractal. Formas fractais podem ser produzidas pelo útil "Iterated Function Systems" (IFS) [14]. Resumidamente, o sistema IFS envolve a aplicação de uma série de transformações de base para um formulário W a uma base elementar A , seguida de várias iterações. IFS pode ser usada efetivamente para produzir a base da antena Koch fractal como mostrado na Figura 48. A transformação inclui dimensionamento, rotação e translação.

A matriz de transformação " w_1 " é responsável por uma linha reta até um terço do seu comprimento original. A matriz " w_2 " é responsável por um terço e gira em 60° . A terceira, w_3 , é semelhante à w_2 , mas com uma rotação de -60° . Finalmente, o quarto turno, w_4 , é apenas uma consequência da terceira matriz, seguida por uma translação. Na Figura 48 estão demonstradas as mudanças.

$$\begin{aligned}
 w_1 &= \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{3} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & w_2 &= \begin{bmatrix} \frac{1}{3} \cos 60 & -\frac{1}{3} \sin 60 & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} \sin 60 & \frac{1}{3} \cos 60 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 w_3 &= \begin{bmatrix} \frac{1}{3} \cos 60 & \frac{1}{3} \sin 60 & \frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} \sin 60 & \frac{1}{3} \cos 60 & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & w_4 &= \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & 0 & 0 \\ \frac{1}{3} & \frac{2}{3} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Equação 11

A primeira iteração da curva de Koch é obtida à partir de:

$$A_1 = \omega(A) = \omega_1(A) \cup \omega_2(A) \cup \omega_3(A) \cup \omega_4(A)$$

Equação 12



Figura 48: Os quatro segmentos que formam a base geral da antena Koch fractal para a primeira iteração

$$h = \frac{\lambda}{4}$$

Equação 13

Para o caso da antena deste projeto, tem-se:

$$l = h \left(\frac{4}{3} \right)^n$$

Equação 14

$$D = \frac{\log(4)}{\log(1 + 2 \cos \theta)}$$

Equação 15

$$f_r = \frac{c}{4l}$$

Equação 16

Onde:

- D : a dimensão
- f_r : frequência de ressonância
- θ : ângulo de impressão
- c : velocidade da luz
- l : tamanho real (perímetro)
- h : altura da antena
- n : número de iterações

Conforme apresentado anteriormente, o design de uma forma fractal dependendo do número de iteração não é de fácil realização, sobretudo fazê-la diretamente no software CST®, portanto à partir das fórmulas 11-16 um código no software MATLAB® foi desenvolvido (código apresentado em anexo) permitindo definir os pontos exatos da geometria fractal (Fig. 49). Uma vez obtidos os pontos geométricos da forma fractal, uma exportação dos dados do MATLAB para o CST foi realizada (Figura 50).

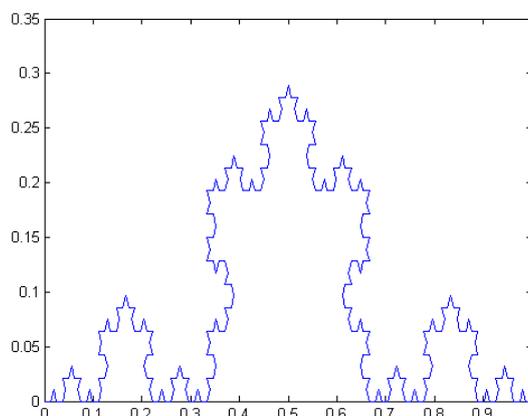


Figura 49: Geometria gerada pelo software MATLAB

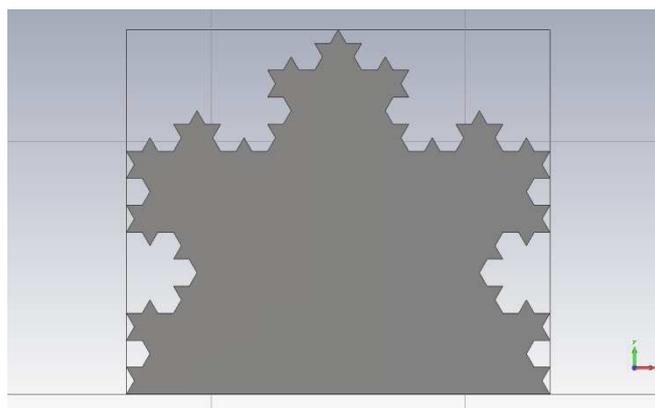


Figura 50 : Estrutura exportada do MATLAB para o CST

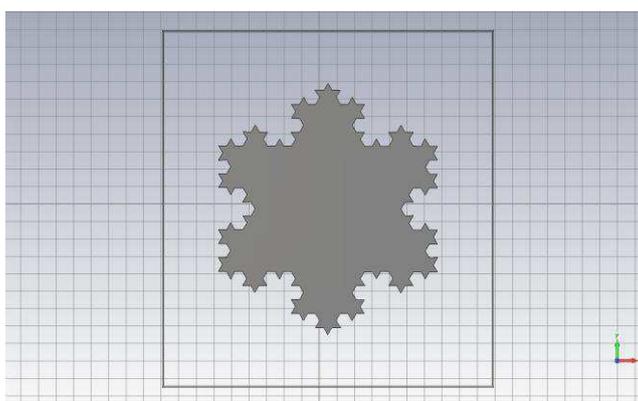


Figura 51: Koch Island (SnowFlake)

Neste projeto, o substrato utilizado foi o Rogers RO4003. O material foi escolhido, pois, é um substrato de baixa perda, ou seja, apresenta um valor baixo para a tangente de perdas. A espessura do dielétrico disponível em nosso laboratório é de 0.88 mm, com uma tangente de perda de 0.0027. A Tabela 11 mostra as especificações do substrato RO4003.

| <i>PARÂMETRO</i> | <i>VALOR</i> |
|---------------------------------|-----------------|
| Permissividade (ϵ) | 3,38 |
| Tangente de perdas (δ) | 0,0027 |
| Condutividade térmica | 0,64 [W/ K / m] |
| Espessura do substrato | 0.8mm |

Tabela 11: especificações do substrato RO4003

Depois de desenhada a estrutura no CST, partiu-se a procura de um ponto de excitação a partir do qual teríamos os “modos localizados”, conseqüente uma alta diretividade. Logo variou-se a posição do ponto de excitação, observando o comportamento da diretividade da antena em determinadas frequências.

Observou-se que para se ter uma boa diretividade em frequências mais baixas, se fazia necessário que o ponto de excitação se localizasse mais próximos das bordas da antena. Observou-se que para o dado ponto de excitação tinha-se uma diretividade interessante à 2.4 GHz (Fig. 52).

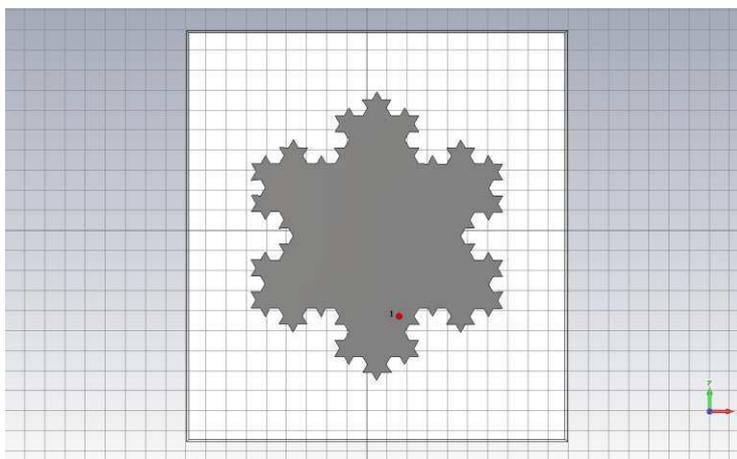


Figura 52: Ponto de excitação (ponto 1)

Após uma série de otimizações com o objetivo de obter uma melhor adaptação da antena à 2.4GHz, obtiveram-se alguns resultados interessantes, apresentados na Figura 53, onde temos um parâmetro S11 de -30dB para a frequência de 2.4GHz.

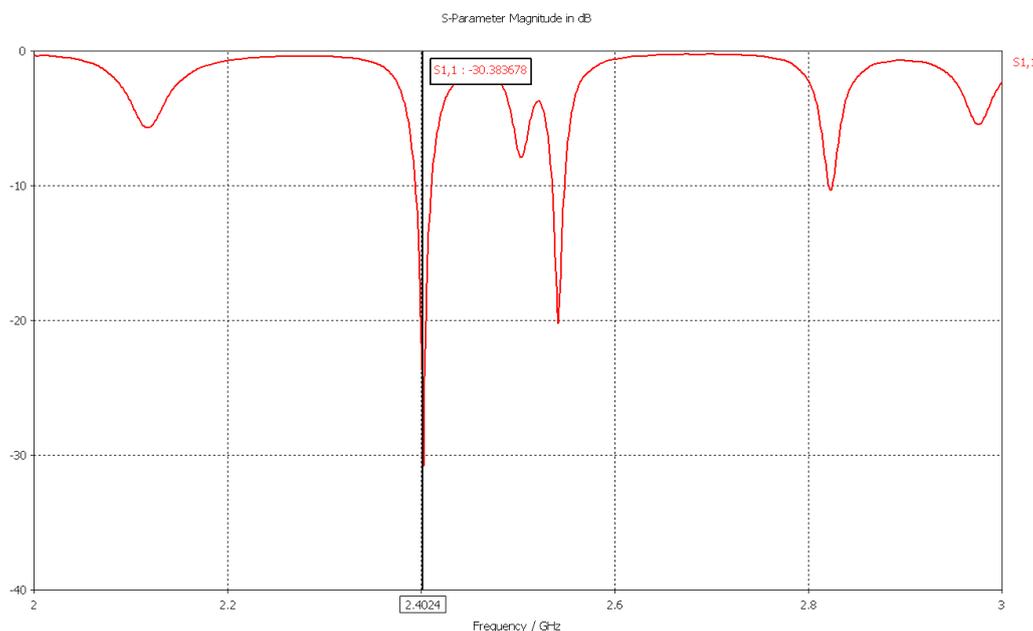


Figura 53: O parâmetro S11- antena Koch Island

Na Figura 54, temos o diagrama de irradiação simulado para a antena Koch Island. Como podemos observar, uma boa excitação nos permite obter um “modo localizado”, portanto, uma boa diretividade. Para esta simulação, temos uma diretividade de 12.48 dB.

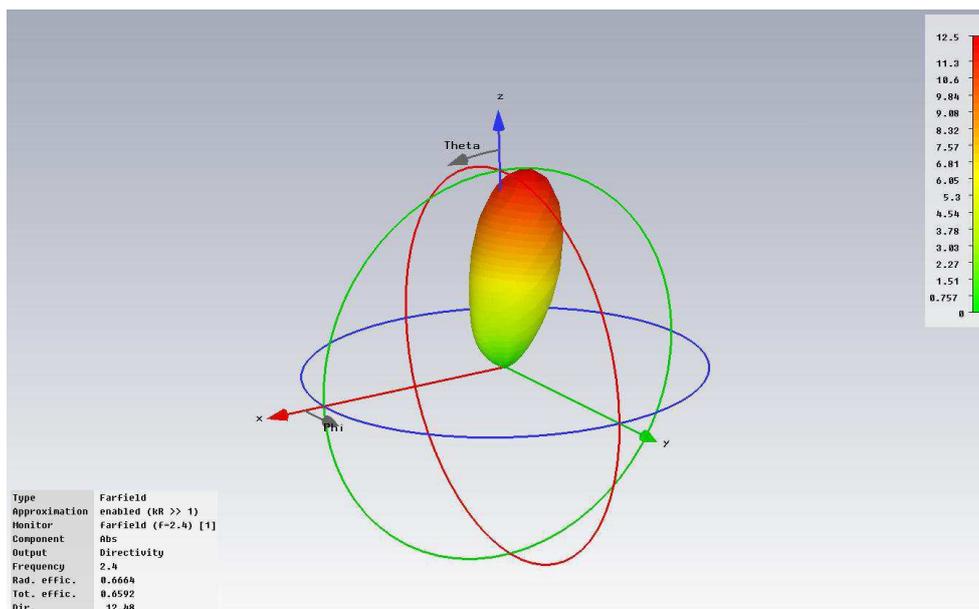


Figura 54: diagrama de irradiação simulado para a antena Koch Island

Após análise dos resultados obtidos até este ponto do projeto, observou-se que mesmo tendo resultados interessantes à 2.4 GHz, no entanto a antena apresenta um tamanho físico desapropriado para esta faixa de frequência, como pode-se verificar na figura 55. Portanto era necessário desenvolver alguma técnica para a miniaturização da antena.

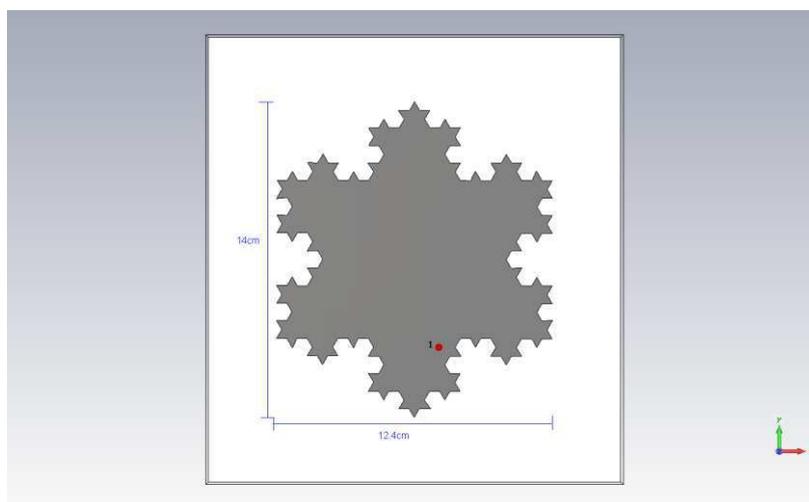


Figura 55: Dimensões físicas da antena Koch Island

Buscando a miniaturização da antena, uma nova simulação foi gerada com o mesmo substrato ROGERS RO4003, mas sem perdas. Observou-se a distribuição do campo elétrico na superfície do Fractal. Verificou-se que havia uma alta densidade de corrente na parte inferior da antena, perto do ponto de excitação (Fig. 56).

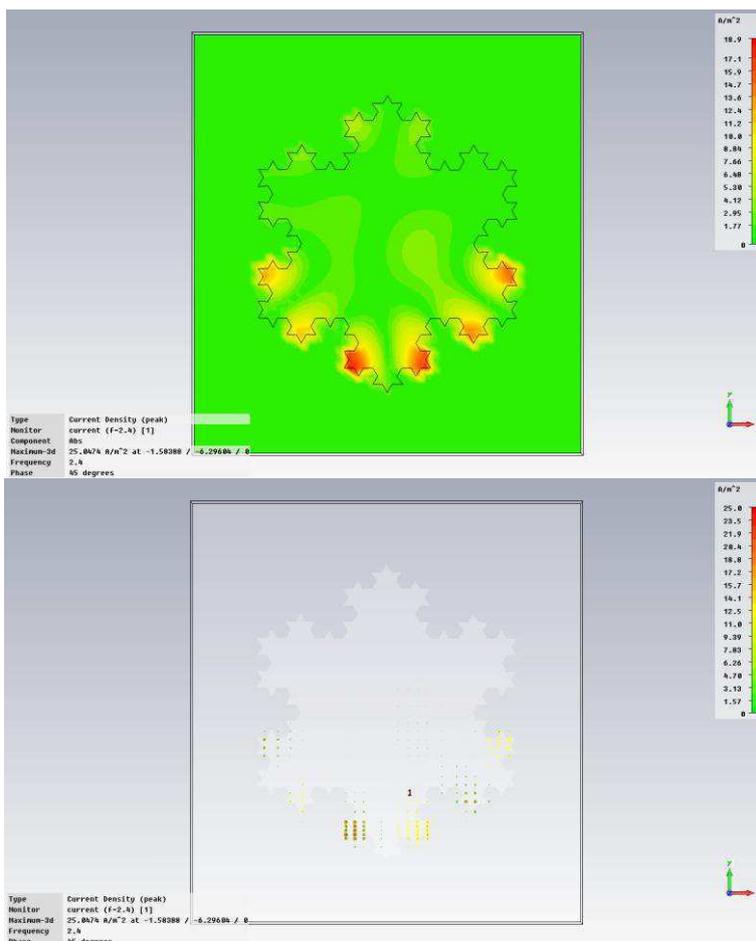


Figura 56: distribuição do campo elétrico na superfície da antena Koch Island

Nas Figuras 57, 58, temos os parâmetros S11 e o diagrama de irradiação à 2.4GHz.

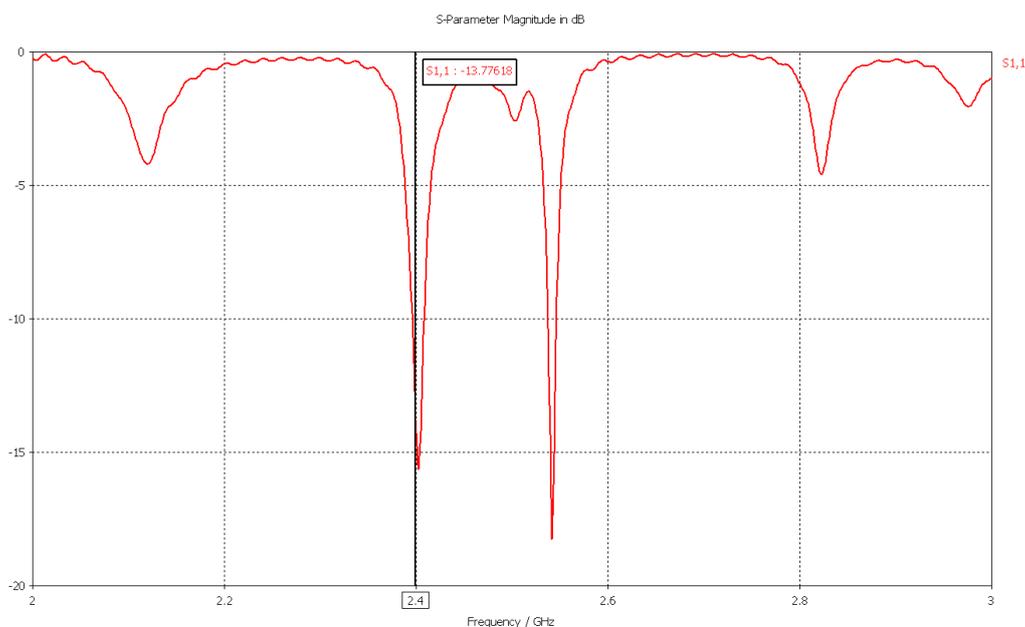


Figura 57: Parâmetros S11 antena Koch Island com o substrato ROGERS 4003 sem perdas

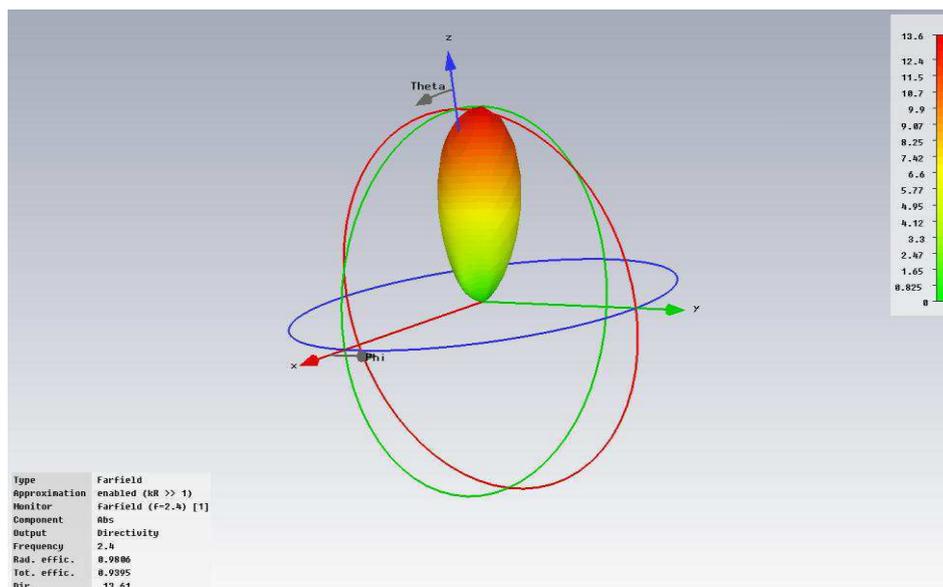


Figura 58: Diagrama de irradiação da antena Koch Island com o substrato ROGERS 4003 sem perdas

Observou-se que na parte superior da antena havia uma pequena concentração, quase nula, da distribuição de corrente, como demonstrado na figura 56, à partir desta análise decidiu-se cortar a antena pela metade e observar o seu comportamento.

Após a análise das simulações, o resultado obtido foi interessante, pois a miniaturização da antena não perturbou de forma significativamente o comportamento da antena original. Mesmo perdendo 4 dB de diretividade, conseguiu-se reduzir o tamanho físico da antena pela metade. Na figura 59, tem-se a nova estrutura, ora denominada de "Les rois". Para esta nova estrutura, tem-se à 2,4 GHz o parâmetro S11 de -19.5dB e uma diretividade de 9.38dB.

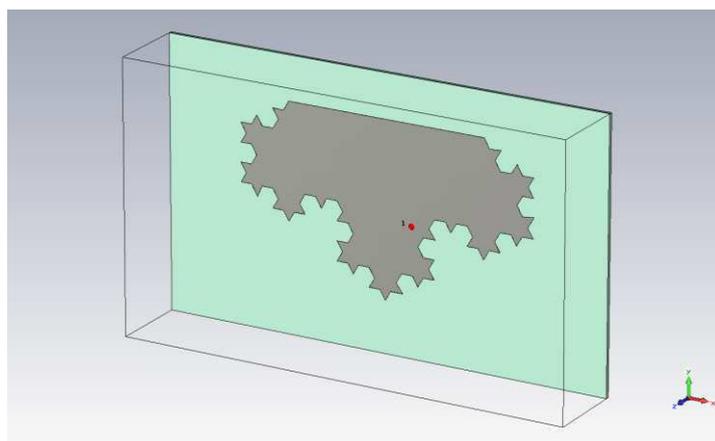


Figura 59: Antena « les rois »

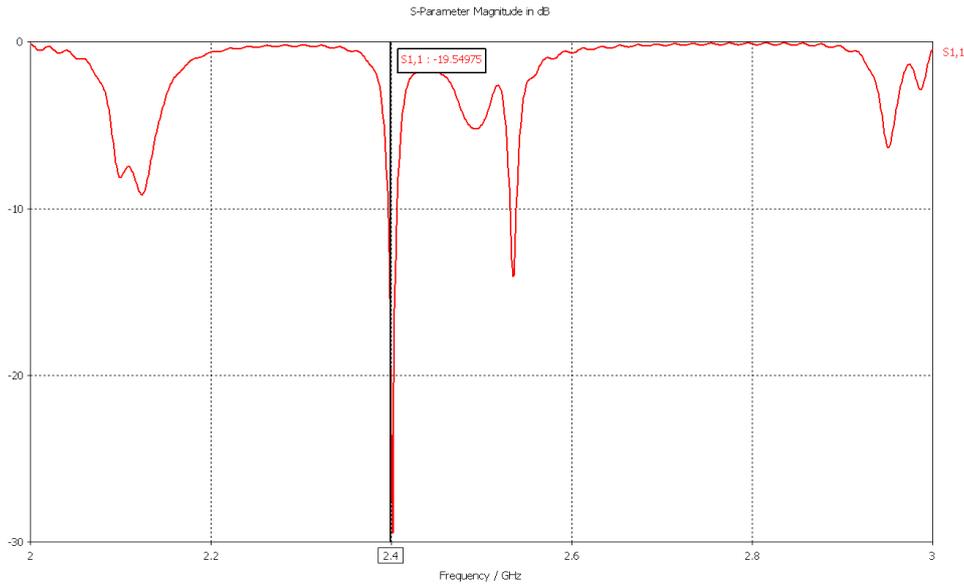


Figura 60 : Parâmetros S11 da antena « les rois »

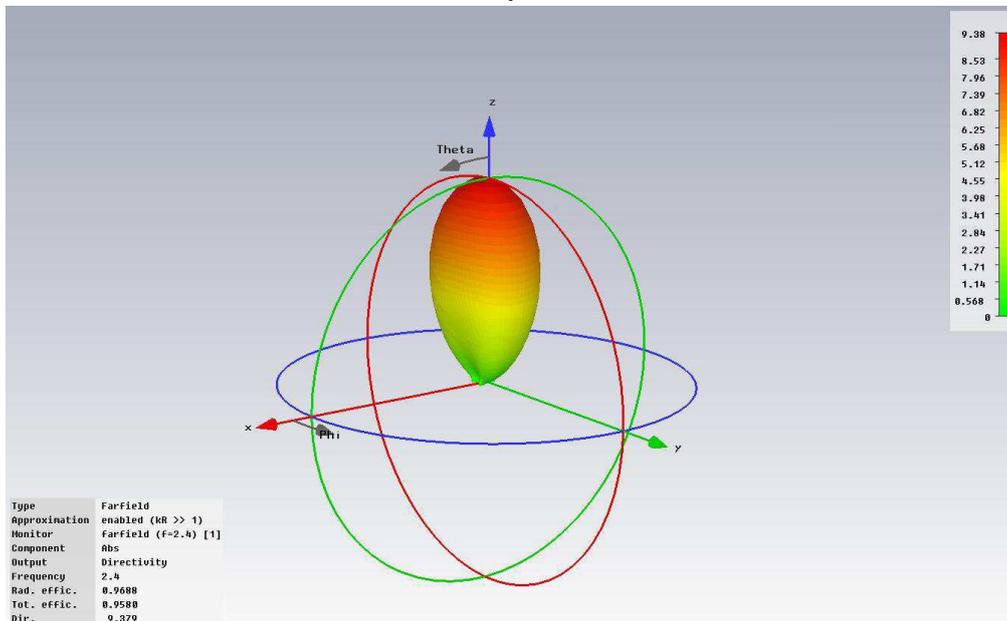


Figura 61: Diretividade da antena « les rois »

Uma vez verificado a eficiência do método de miniaturização, acrescentou-se as perdas ao substrato para aproximar-se mais da realidade.

Com o objetivo de projetar uma antena altamente diretiva para as aplicações RFID, criou-se um arranjo com a antena "Les rois". Na Figura 62 tem-se a nova estrutura.

Nesta nova estrutura, um arranjo de duas antenas « Les Rois », possui como dimensões físicas os seguintes valores (fig. 62): $12.6 \text{ cm} \times 15.3 \text{ cm} = (\lambda/2.7) \times (\lambda/2.2)$.

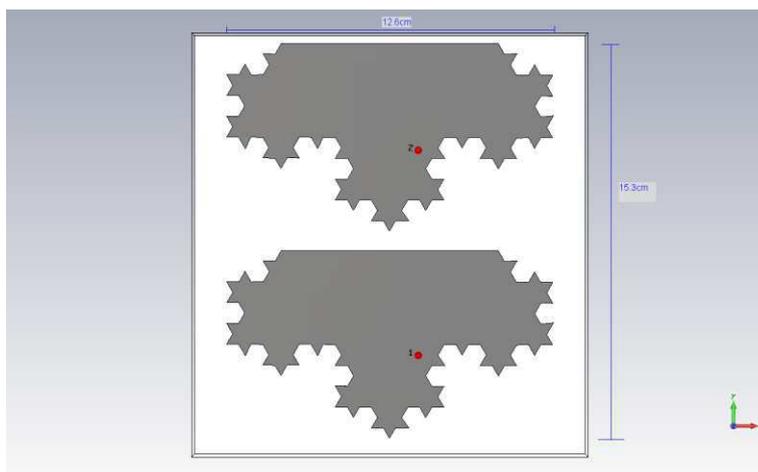


Figura 62: dimensões físicas da antena « Les Rois »

As figuras 63 e 64 apresentam os resultados das simulações obtidas no CST. Na frequência de 2.4GHz, tem-se o S11 igual à -19.5dB e a diretividade da antena é 34.58 (linear).

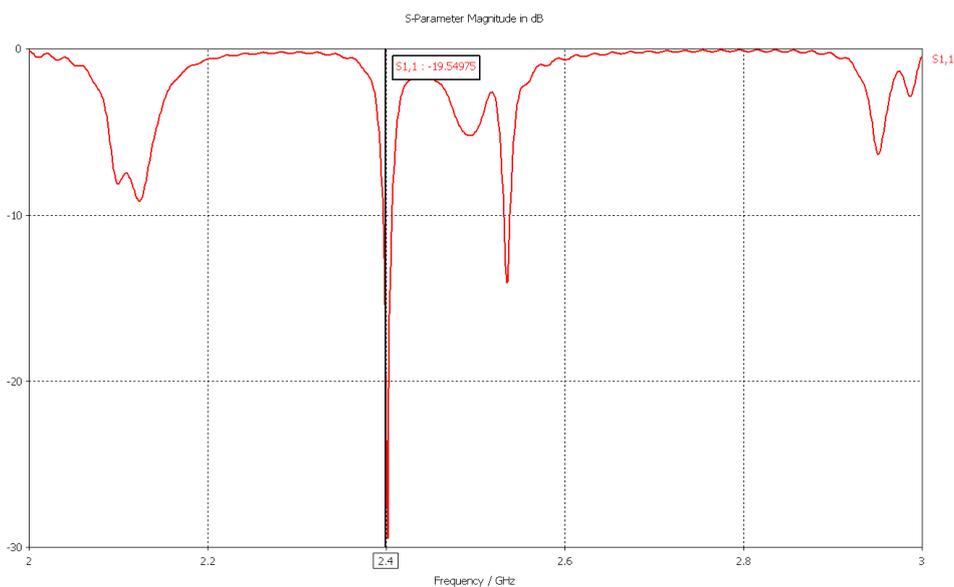


Figura 63: Parâmetros S11 do arranjo de duas antenas « Les Rois »

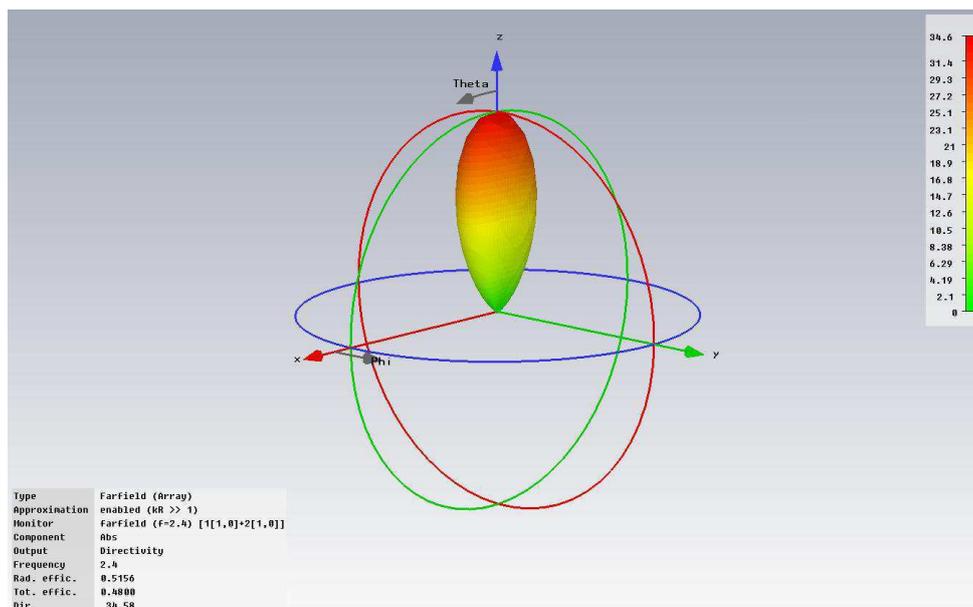


Figura 64: Diretividade do arranjo de duas antenas « Les Rois »

6.2.3. Implementação física : « Les Rois »

O desenvolvimento da antena foi realizado no software CST ®. A partir deste software um arquivo “dxf” criado para o processo de fabricação do circuito impresso da antena. Como a configuração desenvolvida tratava-se de um arranjo de antenas, fazia-se necessário utilizar um divisor de potência para dividir o sinal de forma igual para as duas antenas, como também se necessitava de cabos coaxiais e conectores SMA.

Os cabos coaxiais foram cortados em duas partes iguais, pois as duas antenas deveriam receber a mesma potência. Os conectores foram soldados. Na Figura 66, apresenta-se o protótipo final.

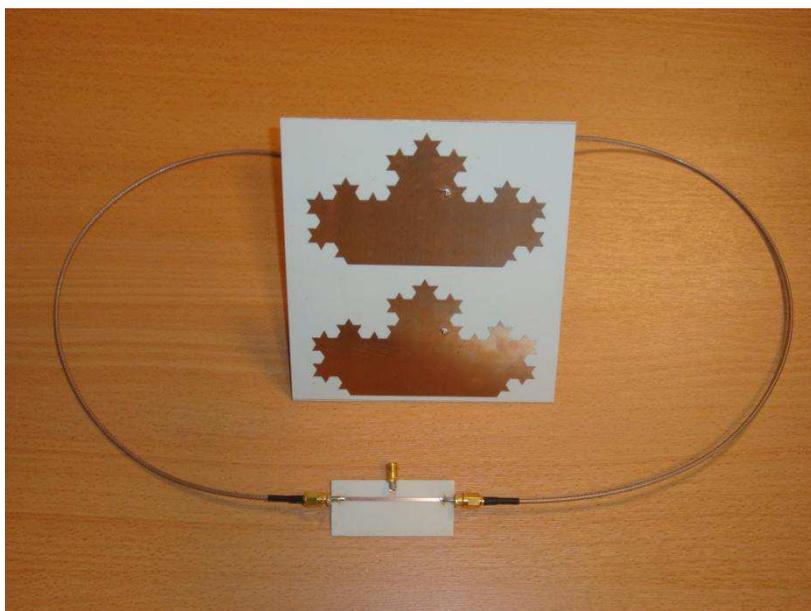


Figura 65: arranjo de duas antenas « Les Rois »

6.2.4. Medições do arranjo de duas antenas « Les rois »

As medições dos parâmetros da antena foram realizadas (Figura 44) na sala das manipulações do laboratório IMEP-LAHC. Eles foram coletados através do VNA, Analisador de Rede 8510 - HP (Figura 66).

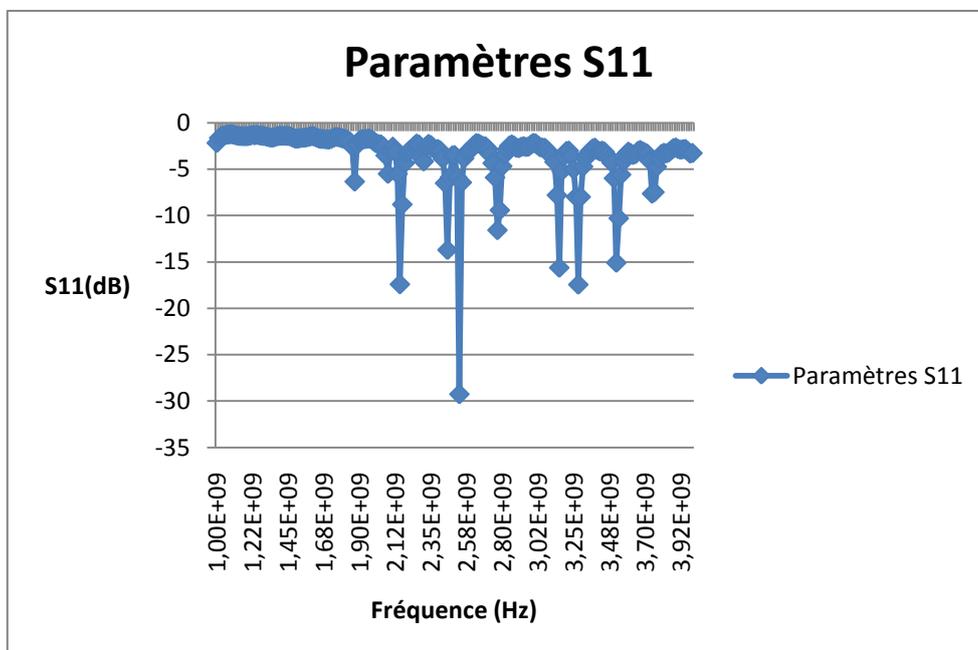


Figura 66: Parâmetros S11 medidos do arranjo de duas antenas « Les Rois »

6.2.5. Comparação de resultados

Na Tabela 12, pode-se comparar os resultados entre a simulação feita no software CST e as medições realizadas com o VNA.

| PARÂMETRO | VALOR TEORICO | VALOR MEDIDO |
|-------------------|----------------------|---------------------|
| S11 (freq=2.4GHz) | -14 dB | -12.3428 dB |
| Diretividade | 34.58 | ---- |

Tabela 12 : comparações dos resultados entre a simulação feita no software CST e as medições realizadas com o VNA

Em geral, os resultados das medições mostraram uma boa coerência com as simulações. Observa-se que os parâmetros S11 medidos, apresentam certa discrepância do valor simulado, no entanto esta diferença entre as simulações e medições pode ser justificada pelos seguintes parâmetros:

- A inserção do divisor de potência é uma fonte de perdas e perturbações
- As diferenças de tamanho entre o protótipo simulado e o protótipo físico
- Os conectores são pontos de descontinuidade e perda.

7. Conclusão

Este estágio teve como ponto de partida um estudo teórico dos diferentes tipos de antenas, o qual permitisse atender a demanda de antenas com um desempenho interessante para aplicações RFID. Observou-se que a geometria fractal pode ser uma boa ferramenta para o desenvolvimento de antenas inovadoras e de alto desempenho, pois esta geometria permite ter-se uma antena diretiva, multifrequencial e tamanho reduzido.

Dentro deste projeto, foram simuladas e otimizadas diferentes configurações de antenas até chegar-se a dois bons resultados: Yagi Sierpinski Gasket e a "Les rois". A primeira antena corresponde de forma interessante ao objetivo deste projeto, pois tem uma alta diretividade, boa largura de banda passante e apresenta várias frequências de ressonância. Na segunda antena desenvolvida também conseguiu-se alcançar o objetivo, mas a sua largura de banda passante não é larga o suficiente. O processo de medições dos resultados das antenas correspondeu a expectativa de forma satisfatória. No entanto, houve uma pequena discrepância entre os valores simulados e medidos da frequência de ressonância para as duas antenas, mas esse erro está dentro da tolerância de fabricação de antenas. Espera-se nos próximos meses medir o diagrama de irradiação das antenas projetadas, passando em seguida para a caracterização das antenas em ambientes reais das aplicações e explorar técnicas para otimizar as antenas desenvolvidas neste projeto.

8. Referências bibliográficas

- [1] S.R. Best, (2005). "The Koch Fractal Monopole Antenna: The Significant of Fractal Geometry in Determining antenna Performance." Technical Report. Manchester, NH: Cushcraft Corporation.
- [2] P. Simebra, (2004). "Design and Implementation of Compact Microstrip Fractal Antennas". Project Report. London, Ontario: The University Of Western Ontario.
- [3] C. Borja, G. Font, S. Blanch, and J. Romeu, "High directivity fractal boundary microstrip patch antenna," *Electron. Lett.*, vol. 36, no. 9, pp. 778–779, Apr. 27, 2000.
- [4] S. Russ, B. Sapoval, and O. Haeberle, "Irregular and fractal resonators with Neumann boundary conditions: Density of states and localization," *Phys. Rev. E*, vol. 55, no. 2, pp. 1413–1421, Feb. 1997.
- [5] Borja, C.: "Fractal Microstrip Patch Antennas with Fractal Perimeter and Self-Affine Properties", Ph.D. thesis, UPC Barcelona, 2001
- [6] C. Puente, J. Romeu, R. Pous, and A. Cardama, "On the behavior of the Sierpinski multiband antenna," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 46, pp. 517–524, Apr. 1998
- [7] J. Soler and J. Romeu, "Generalized Sierpinski fractal antenna," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 49, pp. 1237–1239, Aug. 2001.
- [8] J. Romeu and Y. Rahmat-Samii, "Fractal FSS: A novel multiband frequency selective surface," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 48, pp. 713–719, July 2000.].
- [9] C. PUENTE, J. ROMEU, R. POUS and A. CARDAMA, ' 'On the behaviour of the Sierpinski multiband antenna', *ZEEE Trans*, 1998, AP-46, (4), pp 517-524
- [10] S. RUSS, B. SAPOVAL and O. HAEBERLE : 'Irregular and fractal resonators with Neumann boundary conditions Density of states and localization', *Phys Rev E*, 1997, 55, (2), pp 1413-1421
- [11] C. Puente, J. Romeu, R. Pous, X. Garcia and F. Benitez, "Fractal Multiband Antenna Based On The Sierpinski Gasket", *Electronics Letters* 4th January 1996 Vol 32 No 1
- [14] L. Schulwitz (2005). "The Small Koch Fractal Monopole: Theory, Design and Applications." : University of Michigan.
- [15] DEBORAH PLATT MAJORAS, ORSON SWINDLE, THOMAS B. LEARY, "Radio Frequency Identification: Applications and Implications for Consumers", A Workshop Report from the Staff of the Federal Trade Commission, March 2005
- [16] Youbok Lee, Ph.D., "Antenna Circuit Design for RFID Applications", Microchip Technology Inc., 2003

9. Anexos

9.1. Estimação financeira

9.1.1. Despesas com material de expediente

| <i>Descrição das despesas</i> | <i>Custo estimado</i> |
|--|-----------------------|
| A estrutura física do escritório Pesquisa | 300€* |
| materiais de papelaria | 100€* |
| TOTAL | 400€ |

Tabela 13: Despesas com material de expediente

9.1.2. Despesas com material técnico

| <i>Antena</i> | <i>Conectores</i> | <i>Cabos coaxial</i> | <i>Substrato</i> | <i>Placa metálica</i> | <i>Parafusos de plásticos</i> |
|---------------------------------|-------------------|----------------------|---|-----------------------|-------------------------------|
| Yagi Sierpinski Gasket | 3 fêmeas | 1 (40cm) | FR4 : 1(23cm X 13cm) 1(23cm x 10cm) | 1 (30cmx 16cm) | 12x5cm 4x2cm |
| Les Rois | 3 fêmeas | 1 (40cm) | ROGERS RO4003 | ----- | ----- |
| Custo estimado (por unidade) | 2.50€ | 37€ | FR4 : 10€ ROGERS : 90€ | 17.30€ | 0.30€ |
| TOTAL | 211.10€ | | | | |

Tabela 14 : Despesas com material técnico

| <i>Despesas diversas</i> | <i>Custo estimado</i> |
|---|-----------------------|
| Licenças dos softwares « CST, Matlab » | 2644€* |
| Custo de medições | 1000€* |
| Salário do estagiário | 2274€* |
| TOTAL | 5418€ |

Tabela 15: Despesas diversas

*Os preços são referentes a 6 meses de trabalho

9.2. Lay-out das antenas

9.2.1. Yagi Sierpinski Gasket

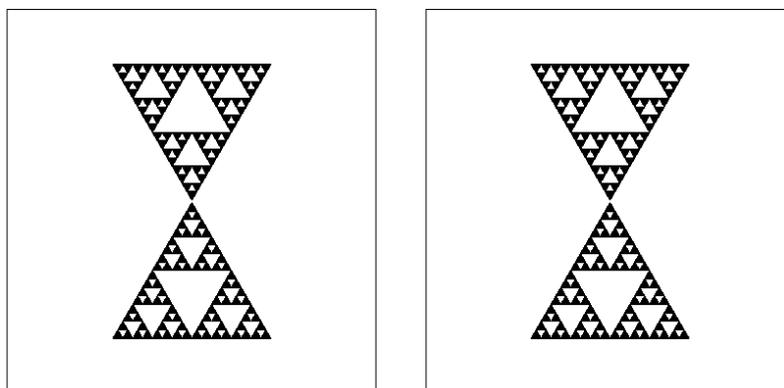


Figura 67: Lay-out das antenas Sierpinski Gasket

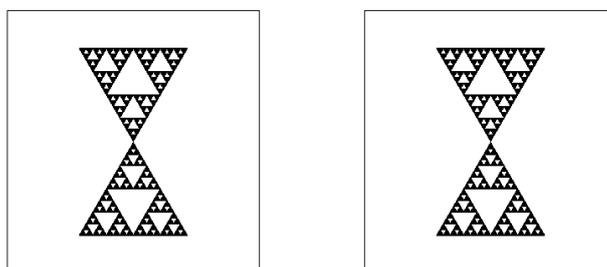


Figura 68 : Lay-out dos diretores das antenas Sierpinski Gasket

9.2.2. Les Rois

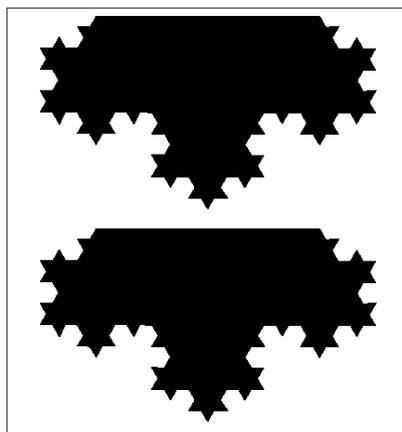


Figura 69 : Layout da antena Les Rois

9.3. Código MATLAB® :

- Concepção da antena Koch Island

`% Define of scale fractal`

`scale = 1;`

`%Define number of interations`

`number =3;`

`w1 = [1/3 0 0 ; 0 1/3 0 ; 0 0 1] ;`

`w2 = [1/3*cos(pi/3) -1/3*sin(pi/3) 1/3 ;`

`1/3*sin(pi/3) 1/3*cos(pi/3) 0 ; 0 0 1] ;`

`w3 = [1/3* cos(pi/3) 1/3*sin(pi/3) 1/2 ;`

`-1/3*sin(pi/3) 1/3*cos(pi/3) 1/6*sqrt(3) ; 0 0 1] ;`

`w4 = [1/3 0 2/3 ; 0 1/3 0 ; 0 0 1] ;`

`%coordinates espacéis in cm`

`v1 = [0 1 ;`

`0 0 ;`

`1 1] ;`

```
%generate fractal to specified number of iterations
```

```
for i = 1 : number
```

```
v1a = w1* v1 ;
```

```
v2a = w2* v1 ;
```

```
v3a = w3* v1 ;
```

```
v4a = w4* v1 ;
```

```
vt = [ v1a v2a v3a v4a ] ;
```

```
v1 = vt ;
```

```
end
```

```
vt = scale*vt( 1 : 2 , : ) ;
```

```
plot(vt ( 1 , : ) , vt ( 2 , : ) )
```

```
return
```