



RELATÓRIO DE ESTÁGIO

ESTUDO DAS POTENCIALIDADES DO PAPEL NO DESENVOLVIMENTO DE METAMATERIAIS

ESISAR

Laboratoire de Conception et d'Intégration de Systèmes – LCIS

Louise May de Oliveira Barbosa

Data do Estágio	Fevereiro a outubro de 2006.
Departamento	Engenharia Elétrica
Orientador ESISAR	Pierre Lemaître-Auger
Responsável	Glauco Fontgalland



Biblioteca Setorial do CDSA. Fevereiro de 2021.

Sumé - PB

Relatório de estágio realizado na França, durante o período de fevereiro a agosto de 2006, através do programa CAPES/BRAFITEC firmado entre ESISAR e UFCG.



Pierre LEMAITRE-AUGER
Professor Orientador - ESISAR

Tân-Phu VUONG
Professor Responsável - ESISAR



Glauco Fontgalland
Professor Responsável - UFCG



Louise May de Oliveira Barbosa
Estagiária - UFCG

Palavras Chave: Metamateriais, Anéis Ressonantes, Índice de Refração Negativo, Meta-papel.

Resumo: o objetivo deste estágio é de estudar as características dos metamateriais e do papel para que se possa utilizar as características destes para se ter uma idéia da viabilidade dos meta-papéis. Os meta-papéis são metamateriais desenvolvidos utilizando o papel como substrato para se obter as características de um metamaterial, como por exemplo, o índice de refração negativo e os parâmetros de permissividade e permeabilidade negativos. Este novo tipo de material permitirá novas aplicações onde é preciso características como flexibilidade e uma pequena espessura, estas podem ser obtidas utilizando o papel como substrato

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me dar forças e por me mostrar caminhos que me permitiram viver essa experiência. A minha família, que de longe sempre apoiou e incentivou todos os meus passos nessa nova caminhada.

Aos Senhores Pierre LEMAITRE-AUGER e Tân-Phu VUONG por me orientar, aconselhar e possibilitar o trabalho ao longo do período de estágio na ESISAR.

Agradeço também a todos os profissionais do laboratório LCIS pelo seu apoio e disponibilização dos meios necessários para desenvolvimento do estágio.

Aos Professores de Universidade Federal de Campina Grande, Glauco Fontgalland e Raimundo Carlos S. Freire pela confiança e oportunidade de participar do programa de cooperação CAPES/BRAFITEC.

Enfim, agradeço aos meus colegas Dalton Guedes, Francisco Osman e Paulo Ixtânio, que dividiram comigo esta nova experiência.

SUMÁRIO

1. Apresentação	7
2. Tabela de Ilustrações	8
3. Introdução	10
4. Objetivos do estágio	11
5. Desenvolvimento do estágio	12
6. Metamateriais	13
6.1. Desenvolvimento histórico	13
6.2. Características de um metamaterial	16
7. Propriedades	28
7.1. Índice de refração negativo	28
7.2. Inversão da Radiação de Cerenkov	31
7.3. Inversão do Efeito Doppler	33
8. Meta-papéis	34
8.1. Características do papel	34
8.2. Conceito de um meta-papel	37
9. CST [®] MICROWAVE STUDIO	39
10. Simulações	40
10.1. Anéis Ressonadores	42
10.2. Estrutura de Quadrados Ressonantes	46
10.3. Anéis Simétricos	49
10.4. Estrutura Ômega	52

11. Conclusão -----	55
12. Anexos -----	57
Anexo A: Modelos e Aplicações de Metamateriais -----	57
Anexo B: Outras Estruturas Simuladas -----	59
13. Bibliografia -----	64

1. APRESENTAÇÃO

As atividades de estágio descritas neste relatório foram realizadas no Laboratório LCIS (Laboratoire de Conception et d'Intégration de Systèmes) na ESISAR (École Supérieure d'Ingénieurs en Systèmes Industriels Avancés Rhône-Alpes) por meio de um acordo de colaboração entre a França e o Brasil a partir do programa CAPES/BRAFITEC. Este programa é um acordo internacional entre a França e o Brasil que permite o intercâmbio de estudantes e por consequência a troca de conhecimentos entre as duas instituições de ensino.

A ESISAR está situada em Valence, França. O Laboratório LCIS é constituído por um grupo de pesquisadores da própria instituição e foi fundado em 1996. As principais áreas de pesquisa do laboratório estão ligadas às formações oferecidas pela ESISAR.

O acordo CAPES/BRAFITEC proporciona aos estudantes a possibilidade de aumentar seus conhecimentos, vivenciar novas experiências e acima de tudo permite a formação de profissionais mais competitivos.

Todo o suporte financeiro (as passagens aéreas e a bolsa) foi fornecido pela CAPES, um órgão do Governo Brasileiro destinado ao aperfeiçoamento dos profissionais de nível superior.

2. TABELA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Primeiro modelo proposto de um Metamaterial	14
Figura 2	Triedro formado pelos vetores E, H e S	16
Figura 3	A estrutura de um anel ressonante	18
Figura 4	Distribuição do campo elétrico dentro da estrutura do anel ressonante	18
Figura 5	Esquema para medição e espectro de transmissão medido para uma estrutura simples de anéis ressonantes	19
Figura 6	Estrutura formada por pequenas hastes.	20
Figura 7	Modelos equivalentes de metamateriais em linha de transmissão	22
Figura 8	Diagrama de dispersão	23
Figura 9	Circuito equilibrado com características mistas e respectivo diagrama de dispersão	24
Figura 10	Índice de refração	26
Figura 11	Rede periódica 1D	27
Figura 12	Célula unitária 2D de um metamaterial	27
Figura 13	Ângulo de refração para um meio tradicional e para um meio metamaterial	28
Figura 14	Os vetores de energia e fase	29
Figura 15	Ângulo da radiação de Cerenkov	32
Figura 16	Efeito Doppler	33
Figura 17	Vista microscópica das fibras do papel jornal	34
Figura 18	Composição das camadas do Meta-papel	37
Figura 19	Célula unitária formada por dois anéis ressonantes concêntricos	42
Figura 20	Parâmetros S para os anéis ressonantes	43
Figura 21	Composição de células unitárias dos anéis ressonantes	43
Figura 22	Parâmetros S para a composição de células unitárias dos anéis ressonantes	44
Figura 23	Distribuição do campo magnético na estrutura dos anéis ressonantes	45
Figura 24	Célula unitária para uma estrutura quadrada	46
Figura 25	Parâmetros S para a estrutura quadrada	47

Figura 26	Composição de células unitárias dos quadrados ressonantes	47
Figura 27	Parâmetros S para a composição das células unitárias quadradas	48
Figura 28	Célula unitária para a estrutura simétrica	49
Figura 29	Parâmetros S para uma célula unitária	50
Figura 30	Composição de células unitárias simétricas	50
Figura 31	Parâmetros S para a composição de células unitárias simétricas	51
Figura 32	Célula unitária de uma estrutura ômega	52
Figura 33	Parâmetros S para a célula unitária ômega	53
Figura 34	Composição de células unitárias da estrutura ômega	53
Figura 35	Parâmetros S para a composição de células unitárias simétricas	54

3. INTRODUÇÃO

O progresso tecnológico observado nos últimos anos foi seguido de uma necessidade de integração e redução das dimensões dos sistemas. Isso fez aumentar o número de pesquisas que buscavam obter materiais que permitissem a construção de dispositivos com características especiais. ←

Muitas pesquisas feitas atualmente são destinadas ao estudo das propriedades de materiais idealizados inicialmente pelo físico russo Veselago. Estes materiais apresentam propriedades jamais observadas em materiais já utilizados e que são encontrados na natureza. Veselago analisou as conseqüências de uma onda eletromagnética que em interação com um material hipotético que possui permeabilidade e permissividade com valores negativos. Ele nomeou estes materiais de *metamateriais*.

Os metamateriais podem ser aplicados em diferentes dispositivos para que se obtenham algumas características especiais desejadas. Uma das prováveis aplicações que é também o tema do estágio desenvolvido é o *Meta-papel*.

Os meta-papéis são estruturas que utilizam o papel e pequenas estruturas condutoras para obter as características de um metamaterial.

Na primeira parte deste relatório, os conceitos teóricos sobre metamateriais e meta-papéis são apresentados. Num segundo momento, são apresentados os resultados obtidos através de simulações e de suas análises.

4. OBJETIVOS

Os objetivos principais deste estágio estão agrupados nos três pontos apresentados a seguir.

- Realização de pesquisa bibliográfica sobre os metamateriais suas características e propriedades para formação de um banco de informações sobre este tema;
- Estudo das características do papel;
- Simulação de diversos modelos de metamateriais utilizando as características dielétricas do papel como substrato.

5. DESENVOLVIMENTO DO ESTÁGIO

Como tema principal deste estágio foi proposto o estudo da viabilidade do meta-papel. Na primeira parte do estágio, foi realizado um estudo bibliográfico exaustivo sobre os metamateriais para se construir uma base de dados com publicações científicas atuais e também materiais contendo explicações sobre o funcionamento e características destes materiais. Foram também estudadas as características dielétricas do papel.

Na segunda parte do estágio, foram realizados estudos sobre as configurações dos metamateriais e de suas propriedades eletromagnéticas, para isso foram feitas simulações utilizando o software CST Microwave Studio®. Em seguida o estudo e a simulação de configurações de meta-papéis foram realizados. Todas as atividades ocorreram dentro do previsto e ao final do estágio foi feita uma apresentação das atividades desenvolvidas para avaliação do trabalho pelos professores responsáveis.

6. METAMATERIAIS

6.1. Desenvolvimento Histórico

Quando descrevemos a propagação de ondas eletromagnéticas em um meio material é conveniente descrever a resposta do material pelos seus parâmetros: a permissividade elétrica ϵ e a permeabilidade magnética μ . Para um material clássico, os parâmetros podem ser diretamente relacionados à carga localizada e a densidade de corrente.

A permissividade ϵ é um índice que descreve a resposta de um material quando submetido a um campo elétrico. A permeabilidade μ é definida a partir da resposta do material a um campo magnético.

Em geral, os materiais possuem uma permissividade e permeabilidade que apresentam valores positivos. Os materiais com ϵ e μ simultaneamente positivos são chamados "materiais duplamente positivos". Os materiais que possuem valores negativos de ϵ e μ , chamados de "materiais duplamente negativos" são raros e não são encontrados na natureza.

Em geral, alguns materiais possuem permissividade negativa para valores de frequência específicos, por exemplo, o ouro, a prata e o alumínio na faixa de frequências óticas (Terahertz). Os sistemas ferromagnéticos ressonantes e antiferromagnéticos apresentam um valor de μ negativo.

Em 1968 o físico russo V. Veselago [1] estudou um material hipotético com valores de μ e ϵ simultaneamente negativos. Este material não é encontrado na natureza, pois, as faixas de frequência onde os materiais possuem uma permissividade negativa são diferentes das faixas onde estes materiais possuem

uma permeabilidade negativa. Por meio de seus estudos Veselago indicou diversas propriedades não comuns que podiam ser observadas no material hipotético.

No estudo da propagação de ondas planas em um material hipotético que possui ϵ e μ simultaneamente negativos, Veselago observou que o Vetor de Poynting para uma onda plana é antiparalelo a direção da velocidade de fase, isto é o contrário do que ocorre em um caso convencional onde uma onda plana se propaga em um meio natural com ϵ e μ positivos.

Em 1999 o cientista inglês John Pendry apresentou o primeiro modelo de um material que possuía os valores de ϵ e μ simultaneamente negativos [2]. Ele estudou um meio constituído por pequenos fios de diâmetro reduzido (hastes), distribuídos de forma periódica para obter um material homogêneo.

Pendry e seus colaboradores mostraram que a estrutura formada por anéis ressonantes poderia apresentar uma permeabilidade efetiva de valor negativo, em uma região particular de frequência.

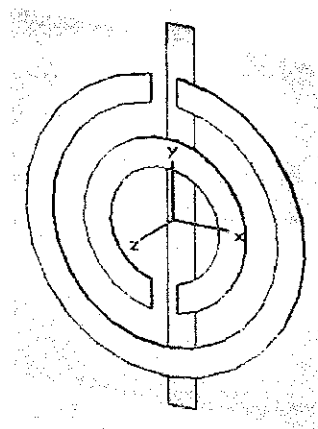


Figura 1- Primeiro modelo proposto de um Metamaterial.

No ano seguinte, o primeiro metamaterial foi construído por Smith e seu grupo de trabalho, na Universidade da Califórnia – San Diego. O metamaterial foi projetado para apresentar um índice de refração negativo na faixa de frequências

de microondas e era composto de anéis ressonantes (SRR – Split-Ring Resonator) e de pequenas hastes feitos de cobre.

Após a construção dos primeiros metamateriais, as pesquisas sobre esse tema aumentaram consideravelmente. As propriedades específicas destes materiais foram estudadas e diversas aplicações foram propostas pelos pesquisadores. As pesquisas possibilitaram um avanço considerável no domínio dos metamateriais trazendo contribuições teóricas e experimentais para ajudar a compreensão as características e propriedades de diversos modelos de metamateriais e mostrando suas aplicações potenciais em dispositivos, componentes e antenas.

6.2. Características de um Metamaterial

Os metamateriais são estruturas artificiais projetadas para apresentar propriedades eletromagnéticas específicas e que não são encontradas em materiais obtidos na natureza. Os metamateriais com valores de constante dielétrica ϵ e permeabilidade magnética μ simultaneamente negativos são normalmente chamados de matérias “duplamente negativos”. Devido essas características esses materiais obedecem a “regra da mão esquerda”, pois ocorre uma inversão da direção do vetor da propagação da energia k em relação à direção de propagação da onda como mostrado na Figura 2. Por esse fato estes materiais foram chamados por Veselago de “Left-Handend”. Pendry e Smith preferiram chamar esse material de “Negative-Index Metamaterials”, pois fazem referência a outra propriedade dos metamateriais, o índice de refração negativo.

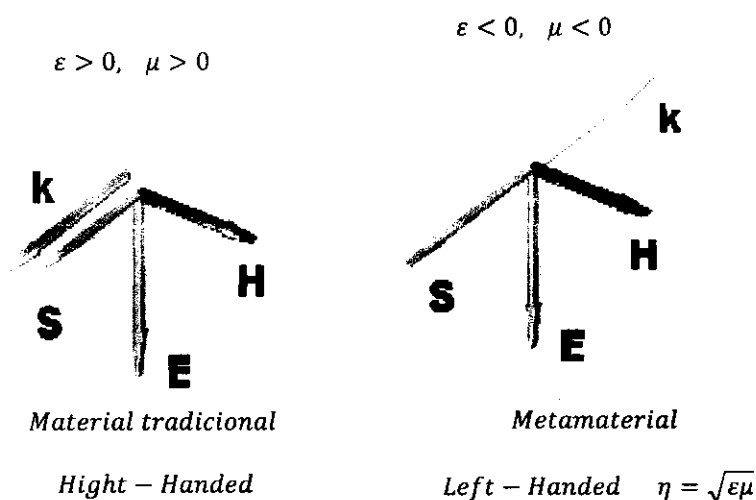


Figura 2- Triângulo formado pelos Vetores E , H e S .

Outras nomenclaturas podem ser encontradas na literatura tendo como referência as características do meio formado por estes. Alguns exemplos mais usuais são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Nomenclaturas para os Metamateriais.

DNG MTM	Double Negative Metamaterial
LHM	Left-Handed Metamaterial
NIM / NRI	Negative / Refractive Index Metamaterial
CRLH	Composite Right / Left Handed

Os metamateriais apresentam propriedades únicas e que ocorrem devido à inversão da direção do vetor de Poynting k . As propriedades mais importantes dos metamateriais são a inversão da Lei de Snell, a inversão do efeito Doppler e do efeito Vavilov-Cerenkov. Estas principais propriedades são descritas no próximo capítulo.

Depois da proposição do primeiro modelo de metamaterial, os anéis ressonantes receberam grande atenção da comunidade científica, principalmente porque estes anéis (SRR – Split-Ring Resonator) mostram grande atividade magnética em altas frequências (gigahertz e terahertz), esta característica não é observada nos materiais encontrados diretamente na natureza. Observa-se ainda o fato destes anéis possuírem uma dimensão pequena quando comparados ao comprimento de onda na frequência de ressonância dessa estrutura.

Utilizou-se a estrutura dos anéis ressonantes para obter a permeabilidade negativa. Esta estrutura ressonante consiste de dois anéis condutores concêntricos cada um com uma fenda. A fenda de cada anel é situada de maneira oposta a do outro anel como mostrado na Figura 3 abaixo.

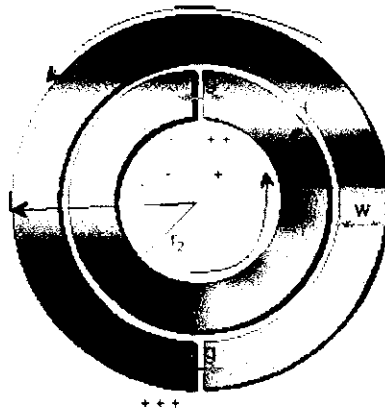


Figura 3- A estrutura de um Anel Ressonante.

Para esta estrutura apresentada as flechas indicam a direção do fluxo de corrente em torno da estrutura. Os parâmetros g , w , d , r_1 e r_2 são as dimensões das fendas, a largura das partes condutoras, a distância entre os anéis e os raios de cada anel respectivamente.

Quando excitado por uma fonte externa, por exemplo, um campo magnético perpendicular ao plano do anel, introduzimos um fluxo de corrente ao longo da estrutura. A corrente induzida é uma corrente solenoidal [6]. Os anéis ressonantes concentram o campo elétrico em suas proximidades. A Figura 4 mostra a distribuição do campo elétrico total para uma célula unitária. A onda plana incidente possui uma amplitude unitária.

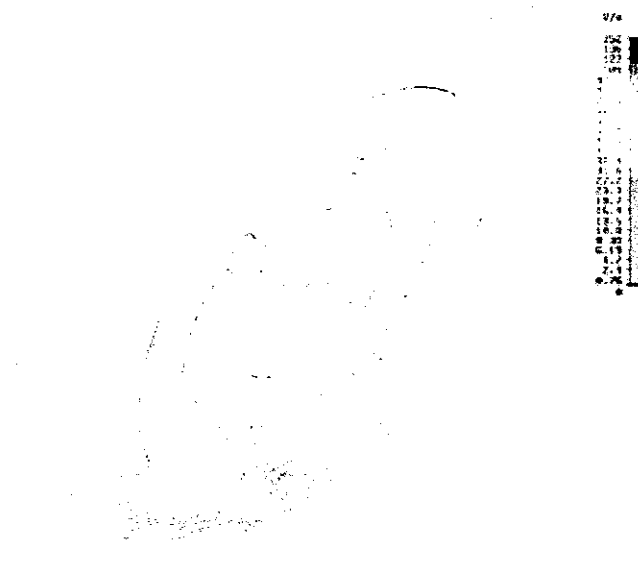


Figura 4- Distribuição do campo elétrico dentro da estrutura do anel ressonante.

A natureza ressonante da estrutura dos anéis é observada como um “buraco” no espectro de transmissão, ou seja, na frequência de ressonância da estrutura, o espectro de transmissão apresenta uma queda acentuada nos níveis de transmissão.

O valor da frequência de ressonância para os anéis ressonantes é determinada a partir dos parâmetros construtivos dos anéis, esses parâmetros são o raio interno r_2 da estrutura e a distância w entre os dois anéis. A expressão para cálculo da frequência de ressonância é apresentada a seguir.

$$f_{res}^{SRR} = \frac{\sqrt{\frac{3w}{\mu_0 \epsilon_0 \pi^2 r_2^3}}}{2\pi \cdot 10^9} \quad (6.1)$$

Podemos medir esta frequência de ressonância através de uma estrutura simples formada por dois monopolos, um para a transmissão e outro para recepção. Os anéis ressonantes são colocados entre as duas antenas para que seja medido o espectro de transmissão da estrutura.

A Figura 5 a seguir mostra o espectro de transmissão e a montagem realizada para medição deste espectro para uma estrutura composta por um anel ressonante [6]. Para esta configuração também foram simuladas duas estruturas com as mesmas dimensões sendo que uma possui a fenda e a outra é formada por anéis sem a fenda (estrutura fechada).

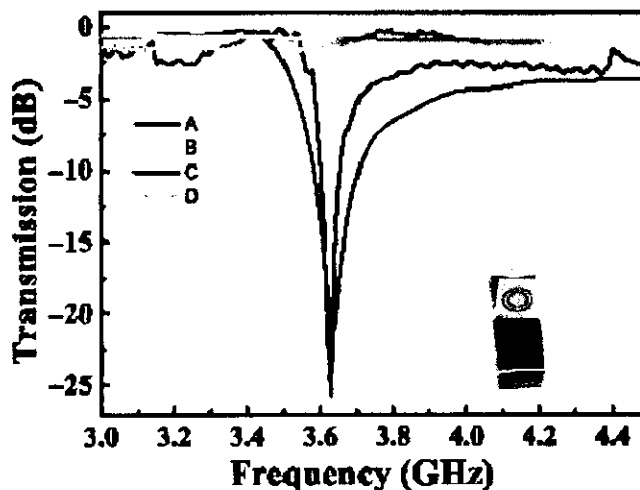


Figura 5- Esquema para medição e espectro de transmissão medido para uma estrutura simples de anéis ressonantes.

Na figura acima são apresentadas quatro curvas onde as curvas identificadas por A e B mostram o espectro de transmissão medido, para a estrutura ressonante (com fenda) e para a estrutura fechada (sem fenda) respectivamente. As curvas C e D mostram o espectro de transmissão simulado da estrutura ressonante e da estrutura fechada respectivamente. Podemos observar que os anéis que possuem as fendas apresentam uma frequência de ressonância, diferentemente do que ocorre para a estrutura fechada onde o espectro de transmissão está sempre em torno de zero dB indicando que não ocorre a ressonância na faixa de frequências medida.

Como forma de obter a constante dielétrica negativa são utilizadas pequenas hastes de cobre como mostrado na Figura 6. Para um metal sem perdas a constante dielétrica é calculada pela seguinte equação:

$$\epsilon_{metal} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (6.2)$$

A frequência de plasma ω_p é dada por:

$$\omega_p = \frac{ne^2}{\epsilon_0 m_e} \quad (6.3)$$

onde n é a densidade de elétrons, e é a carga de um elétron e m_e é a massa efetiva de um elétron.

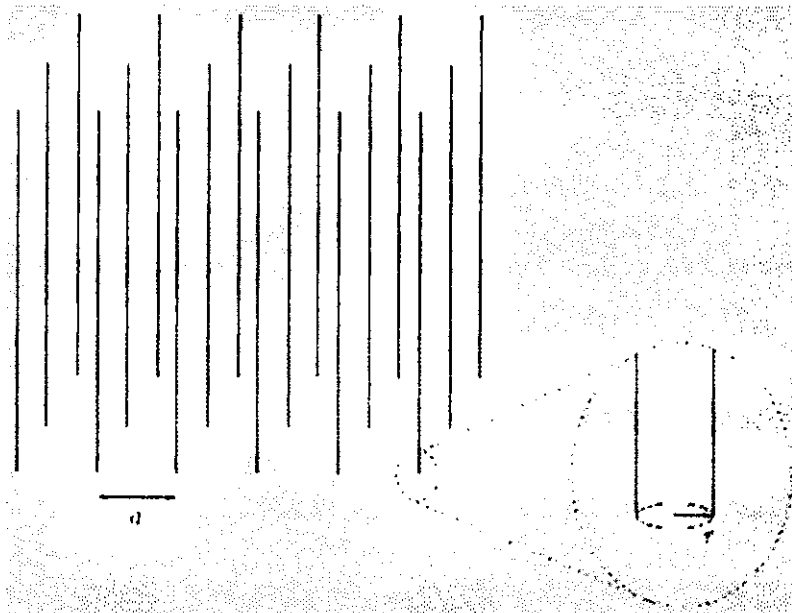


Figura 6- Estrutura formada por pequenas hastes.

Construindo-se a estrutura mostrada na Figura 6, se consegue confinar uma quantidade de elétrons em um pequeno espaço, o que modifica a densidade de elétrons dentro da estrutura. O campo elétrico incidente na estrutura deve ser paralelo as hastes. Esta nova densidade de elétrons é definida em função do raio r de cada haste e da periodicidade a dos fios [7].

$$n_{eff} = \frac{n \cdot \pi \cdot r^2}{a^2} \quad (6.4)$$

Como a estrutura formada pelos anéis ressonantes e pelas pequenas hastes apresenta perdas e que são muito pequenas e próximas uma das outras, elas oferecem dificuldade para que se faça um modelo teórico através de equações e também para sua utilização na banda de microondas.

Observa-se ainda que estas estruturas utilizam os mesmos princípios das estruturas planares, com linhas de transmissão que podem ser representadas por um circuito equivalente formado por indutâncias e capacitâncias. Os pesquisadores consideraram então que era possível obter uma aproximação das estruturas “Left-Handed - LH” utilizando para isso a teoria das linhas de transmissão.

Modelando o metamaterial como uma linha de transmissão equivalente pode-se utilizar a teoria de linhas de transmissão para analisar e construir metamateriais em 1 2 ou 3 dimensões e também é possível o uso de componentes discretos para se obter as características de metamaterial.

Um meio “Left-Handed - LH” pode ser considerado como homogêneo quando as dimensões das células unitárias, ao longo da direção de propagação das ondas dentro da estrutura, forem muito menores que o comprimento de onda utilizado. Quando isto ocorre, a teoria de linhas de transmissão pode ser utilizada. A partir da estrutura do metamaterial se constrói o modelo equivalente em linha de transmissão utilizando para isto uma rede LC . A rede LC fornece uma boa aproximação em linha de transmissão para um metamaterial.

Os modelos em linha de transmissão para os materiais homogêneos, sem perdas e que obedecem somente a “regra da mão direita” (PRH – Purely Right-

(PLH – Purely Left-Handed) e para os materiais que obedecem as duas regras são apresentados na Figura 7 nesta seqüência.

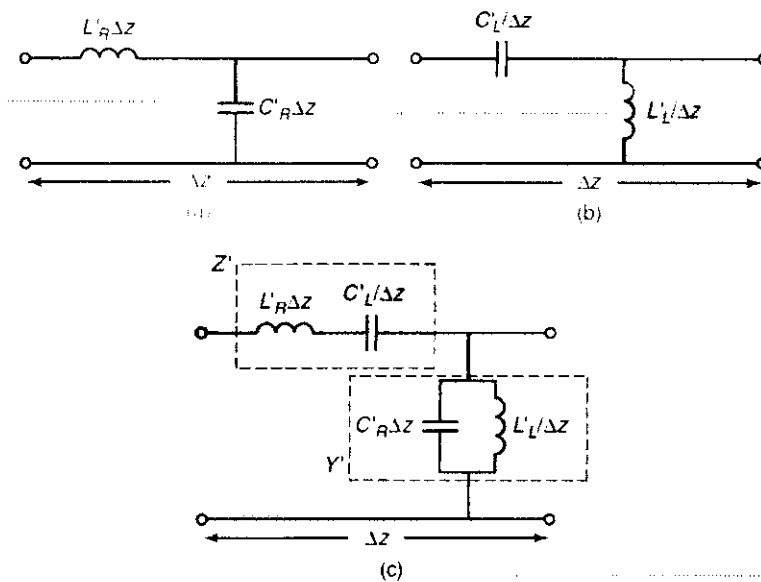


Figura 7- Modelos equivalentes de metamateriais em linha de transmissão.

A Figura 7 mostrada anteriormente apresenta os modelos em linha de transmissão para (a) um material homogêneo que obedece a regra da “mão direita”; (b) um material homogêneo com características de um metamaterial e (c) um material homogêneo com características de um material comum em determinada faixa de freqüências e com características de metamaterial em outra faixa de freqüências.

Todos os modelos são formados por uma combinação de capacitâncias e indutâncias numa determinada unidade de comprimento [4], ou seja, cada circuito representa uma célula unitária e sua dimensão ΔZ é definida pela periodicidade da estrutura.

Na realidade, uma estrutura de um metamaterial puro não é realizável por conta dos inevitáveis efeitos das indutâncias e capacitâncias parasitas. A existência de capacitâncias parasitas se deve ao desenvolvimento de gradientes de tensão ao longo da estrutura. A indutância parasita é causada pelo fluxo de corrente ao longo da estrutura metálica.

A constante de propagação para uma linha de transmissão é definida pela seguinte equação:

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{Z'Y'} \quad (6.5)$$

onde Z' e Y' são respectivamente a impedância e a admitância por unidade de comprimento. No caso particular de um material com características mistas de um material tradicional e de um metamaterial, os parâmetros Z' e Y' são definidos por:

$$Z'(\omega) = j\left(\omega L'_R - \frac{1}{\omega C'_L}\right) \quad (6.6)$$

$$Z'(\omega) = j\left(\omega L'_R - \frac{1}{\omega L'_L}\right) \quad (6.7)$$

Um material com características mistas apresenta uma “banda proibida” que não é observada em outros modelos de materiais PLH e PRH. A Figura 8 [4] apresenta a relação entre $\omega - \beta$ ou o diagrama de dispersão para linhas de transmissão com características de um metamaterial, de um material tradicional e de um material com características mistas respectivamente, cujo modelo foi apresentado na figura 7. Na Figura 8(c) podemos observar a banda proibida onde γ é puramente real.

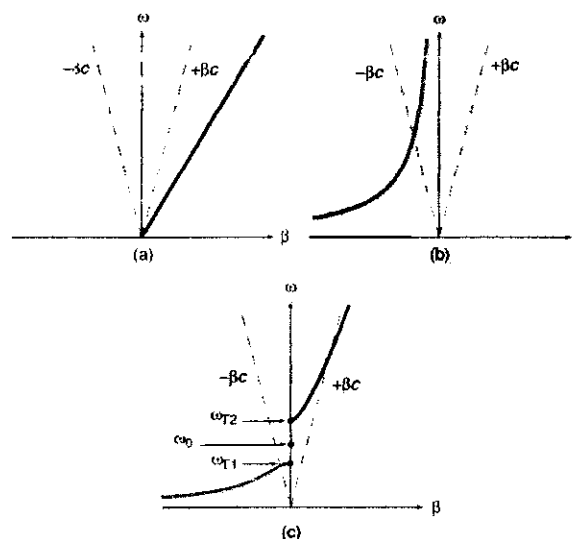


Figura 8- Diagrama de dispersão.

Observa-se também que o metamaterial com características mistas possui duas regiões bem definidas, uma região “left-handed” com $v_g v_p < 0$ e uma região “right-handed” com $v_g v_p > 0$.

No caso de um circuito equilibrado onde os componentes em série e em paralelo são iguais, a frequência de ressonância é única.

$$L'_R C'_R = L'_L C'_L \quad (6.8)$$

Se o circuito equivalente está na forma simplificada podemos obter um novo diagrama de dispersão apresentado na Figura 9 [4] a seguir, junto com o novo circuito equivalente.

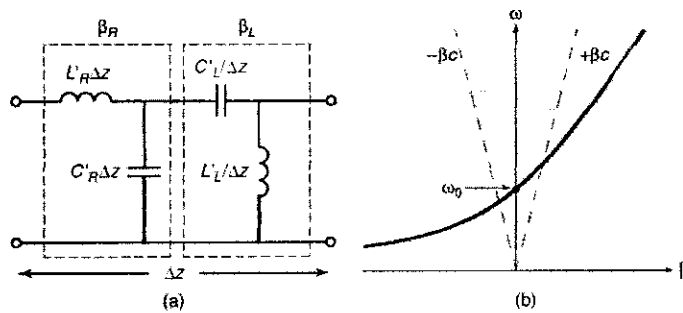


Figura 9- Circuito equilibrado com características mistas e respectivo diagrama de dispersão.

A constante de propagação é definida por:

$$\beta = \beta_R + \beta_L = \omega \sqrt{L'_R C'_R} - \frac{1}{\omega \sqrt{L'_L C'_L}} \quad (6.9)$$

onde β_R é o termo da constante de propagação referente ao comportamento de um material tradicional e β_L refere-se ao comportamento metamaterial.

O diagrama de dispersão para a linha homogênea, com características mistas, mostrada na Figura 9(b), indica que a transição do comportamento como metamaterial para um comportamento tradicional do material, ocorre na frequência ω_0 dada por:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt[4]{L'_R C'_R L'_L C'_L}} \rightarrow \text{desequilibrado}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L'C'}} \rightarrow \text{equilibrado} \quad (6.10)$$

Como ocorre no caso não equilibrado, existe uma frequência de transição, entretanto a curva de dispersão não apresenta uma banda proibida no espectro.

A impedância característica para uma linha de transmissão é dada por:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{Z'}{Y'}} \quad (6.11)$$

Para um material "left-handed" a impedância característica é obtida através da seguinte equação:

$$Z_0 = Z_L \sqrt{\frac{L'_R C'_{L'} \omega^2 - 1}{L'_L C'_{R'} \omega^2 - 1}} \rightarrow \text{caso desequilibrado} \quad (6.12)$$

no caso equilibrado temos que $Z_L = Z_R$, onde Z_L é a impedância do material puramente "left-handed" (LH) e Z_R é a impedância de um material puramente "right-handed" (RH) e dão dados respectivamente por:

$$Z_L = \sqrt{\frac{L'_L}{C'_{L'}}} \quad (6.13)$$

$$Z_R = \sqrt{\frac{L'_R}{C'_{R'}}} \quad (6.14)$$

Observamos então pela equação (6.12) que no caso de uma estrutura desequilibrada, a impedância característica é dependente da frequência. Sendo assim a impedância característica Z_0 pode ser relacionada à impedância intrínseca η do material dada por:

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (6.15)$$

Assim é possível reescrever a impedância característica do material em função dos parâmetros ϵ e μ .

$$Z_0 = \eta \text{ ou } \frac{Z'}{Y'} = \frac{\mu}{\epsilon} \quad (6.16)$$

A partir desta relação pode-se definir a permeabilidade e a permissividade de um material a partir dos parâmetros de impedância e admitância do modelo equivalente em linha de transmissão.

$$\mu = \frac{Z_I}{j\omega} = L'_R - \frac{1}{\omega^2 C'_L} \quad (6.17)$$

$$\mu = \frac{Z_I}{j\omega} = L'_R - \frac{1}{\omega^2 C'_L} \quad (6.18)$$

O índice de refração para o caso equilibrado e desequilibrado de um material com características mistas (RH/LH) é mostrado na Figura 10 abaixo. Observa-se para este tipo de material que ele apresenta um índice de refração positivo quando se comporta como um material RH e um índice de refração negativo quando tem comportamento de um material LH.

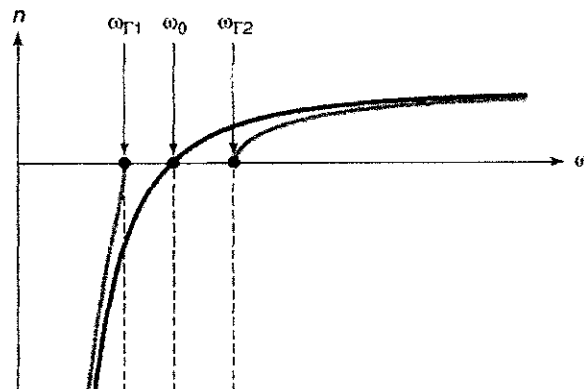


Figura 10- Índice de Refração.

$$n = \frac{c\beta}{\omega} \quad (6.19)$$

Uma linha de transmissão homogênea – quando o comprimento da onda eletromagnética guiada é bem maior que as dimensões das discontinuidades da linha – com comportamento misto (RH/LH), de comprimento d , pode ser construída se conectando estruturas LC unitárias de modo a formar uma rede periódica. Se o comprimento da célula unitária é muito menor que o comprimento da onda guiada ($p < \lambda_g/4$), a linha de transmissão formada pelas células unitárias de comprimento p é vista pela onda eletromagnética como uma estrutura

homogênea de comprimento total $d = Np$, onde N é o número de células unitárias que compõem a linha.

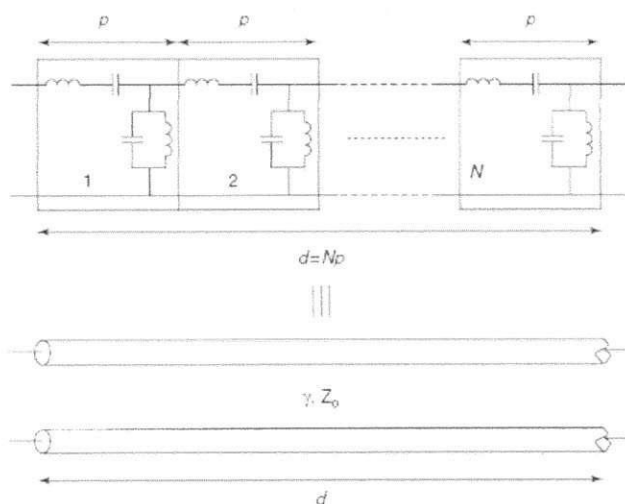


Figura 11- Rede periódica 1D.

A Figura 11 apresentada acima é o circuito equivalente de uma estrutura 1D em linha de transmissão formada por células unitárias. Pode-se empregar a mesma estrutura para obter um modelo 2D, ou mesmo 3D, utilizando como base a célula unitária. A Figura 12 a seguir mostra a célula unitária que é a base para construção de um metamaterial em 2D.

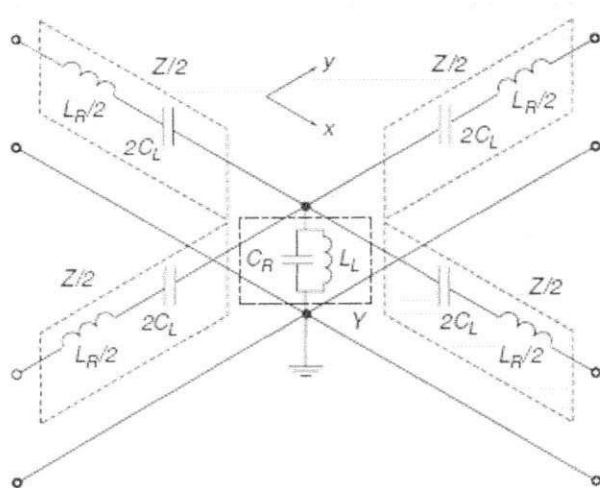


Figura 12- Célula unitária 2D de um metamaterial.

7. PROPRIEDADES

7.1. Índice de Refração Negativo

A propriedade de inversão da lei de Snell que ocorre quando uma onda que se propaga em um material tradicional e incide sobre a interface um meio LH (Left-Handed) é provocada pelo índice de refração negativo, característico deste meio LH.

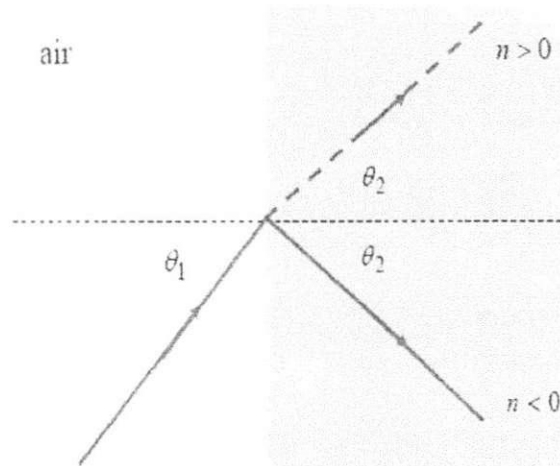


Figura 13- Ângulo de refração para um meio tradicional e para um meio metamaterial.

A Figura 13 apresenta os ângulos de refração para dois materiais. Inicialmente a onda se propaga no ar e incide na interface destes dois materiais, um com índice de refração positivo ($n > 0$) e outro com índice de refração negativo ($n < 0$).

As equações de Maxwell possibilitam determinar como as ondas eletromagnéticas se propagam em um meio. Estas equações podem ser resolvidas para se chegar a uma equação de onda da forma:

$$\frac{\partial^2 E(x,t)}{\partial x^2} = \epsilon\mu \frac{\partial^2 E(x,t)}{\partial t^2} \quad (7.1)$$

Se ϵ e μ são simultaneamente positivos ou negativos, eles não influenciarão no resultado porque entram na equação acima como um produto. Realmente, as soluções da equação de onda tem a forma:

$$\exp[i(nkd - \omega t)] \quad (7.2)$$

onde $n = \sqrt{\epsilon\mu}$ é o índice de refração.

As soluções existem para os casos em que ϵ e μ são simultaneamente positivos ou simultaneamente negativos.

Um índice de refração negativo implica que a fase da onda que atravessa o meio será negativa, observe a Figura 14(b). Esta inversão da direção de propagação da onda gera implicações importantes para quase todos os fenômenos eletromagnéticos. A Figura 14 mostra os vetores de energia e de fase para uma onda se propagando em (a) um material tradicional (RH) e (b) em um metamaterial.

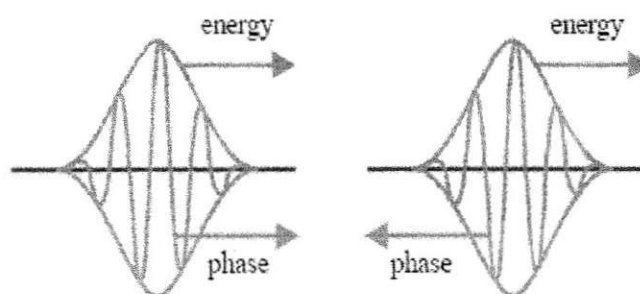


Figura 14- Vetores de energia e fase.

A primeira experiência mostrando a refração negativa foi feita no ano de 2001 por Shelby e seus colaboradores. Eles mediram a potência refratada em função do ângulo para uma amostra de um metamaterial em forma de cunha bidimensional, confirmando assim as propriedades previstas. Em 2003, Houck e

seus colegas, no MIT, repetiram a experiência do índice de refração negativo utilizando para realização os mesmos métodos de Shelby, porém para um metamaterial com índice de refração negativo, os resultados confirmaram os originalmente obtidos por Shelby.

O conceito de refração negativa foi generalizado para estruturas em linha de transmissão, comuns em aplicações da eletroeletrônica.

Continuando a analogia entre os elementos de circuito concentrados e os parâmetros materiais, Eleftheriades demonstrou a existência de fenômenos de refração negativa em circuitos de microondas. O modelo em linha de transmissão foi provado e é particularmente válido para o desenvolvimento de dispositivos na faixa de microondas. Tatsuo Itoh e Christophe Caloz aplicaram o modelo em linha de transmissão para desenvolver componentes microondas, por exemplo: antenas, acopladores e circuitos ressonantes.

7.2. Inversão da Radiação de Cerenkov

Dentre as propriedades únicas dos materiais LH, a inversão da radiação de Cerenkov foi mencionada por Veselago [1], mais não foi demonstrada matematicamente por este. Em 1934, P. A. Cerenkov observou experimentalmente este tipo de radiação para um meio convencional (RH).

Para os materiais standard, a potência e as partículas se propagam em uma mesma direção. Para os materiais LH, ocorre o contrario, as direções de propagação das partículas e da potência são opostas.

A radiação de Cerenkov se produz quando uma partícula carregada de desloca em um meio com uma velocidade superior àquela da propagação da luz no mesmo meio ($v = c/n$). Temos a relação a seguir.

$$v_{particula} > \frac{c}{n} \quad (7.3)$$

onde n é o índice de refração do meio.

Neste caso, uma onda eletromagnética de choque é criada, da mesma maneira que uma onda sonora na passagem da barreira do som. A frente de onda apresenta um formato cônico e é emitida a um ângulo determinado por:

$$\cos\theta = \frac{v}{V} = \frac{c/n_0}{V} \quad (7.4)$$

onde v é a velocidade de phase das ondas eletromagnéticas, V é a velocidade da partícula e n_0 é o índice de refração do meio. Esta expressão sugere que para um meio com índice de refração negativo, o ângulo θ é obtuso. Isto implica que a radiação é dirigida para trás, sendo contraria ao vetor velocidade de fase da onda que se propaga em um material LH.

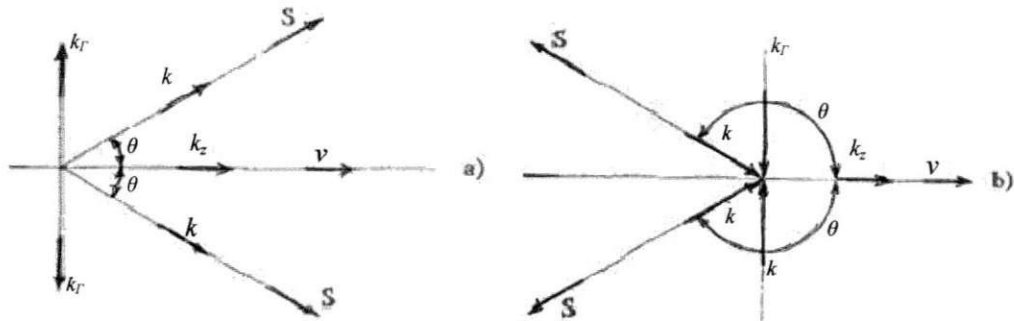


Figura 15- Ângulo da radiação de Cerenkov.

A Figura 15 apresentada acima mostra o ângulo de formação do cone da radiação de Cerenkov para um material (a) RH e (b) LH. Se a velocidade aumenta, o ângulo aumenta e o cone de emissão se abre. Em geral, quando a radiação de Cerenkov ocorre, há também a emissão de um espectro contínuo com fótons polarizados linearmente.

7.3. Inversão do Efeito Doppler

O Efeito Doppler é um fenômeno bastante conhecido, onde um objeto em movimento emitindo uma onda apresenta uma frequência diferente em relação à frequência da onda na fonte. Este efeito foi descoberto por Christian Doppler em 1843.

O Efeito Doppler acontecendo em um material convencional, indica que a frequência da onda produzida pela fonte aumenta à medida que o objeto se aproxima da fonte.

Em 1968, o Efeito Doppler invertido foi previsto para se produzir em um material LH com constante dielétrica e permeabilidade, simultaneamente negativos [1]. Em um material LH, a onda produzida pela fonte e que se propaga em direção ao objeto apresenta frequências que diminuem à medida que o objeto se aproxima da fonte, indicando que o comprimento de onda medido aumenta a medida que o objeto se aproxima da fonte.

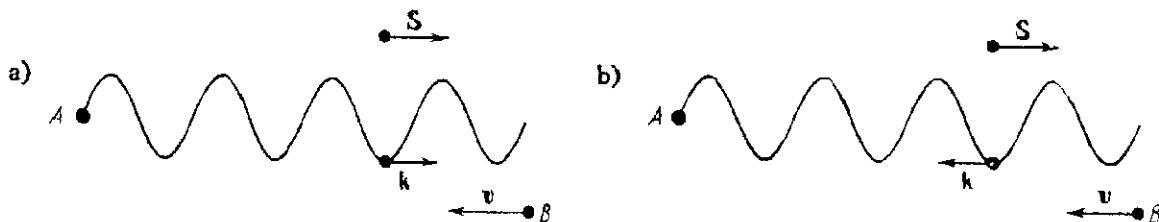


Figura 16- Efeito Doppler.

A Figura 16 acima mostra o Efeito Doppler ocorrendo em um material a) convencional e b) Left-Handed (LH). A Letra A representa a fonte de radiação e a letra B representa o receptor ou o objeto.

8. OS META-PAPÉIS

8.1. Características do Papel

O papel foi criado na China no final do terceiro século antes de cristo. No século VIII, os árabes aprenderam a arte chinesa de fabricação do papel e transmitiram-na para o ocidente. Mais foi no século XIX que a indústria do papel se desenvolveu e no século seguinte ela se transformou na indústria de hoje em dia.



Figura 17- Vista microscópica das fibras do papel jornal.

As fibras vegetais da madeira constituem mais de 90% da massa do papel. Os 10% restantes são impurezas de outros vegetais. Encontra-se igualmente algumas fibras artificiais ou sintéticas, utilizadas em alguns fins específicos como papeis com sistemas de segurança ou de autenticidade (como cheques e notas de dinheiro). São usadas ainda fibras minerais e fibras animais. Na maior parte do papeis de uso comum, as fibras vegetais de madeira virgem ou reflorestada são suficientes para constituir uma folha de papel. Em contrapartida, para usos específicos, fibras oriundas de outros vegetais são também utilizadas. A variedade de sua morfologia permite ao papel desenvolver algumas propriedades particulares [11].

O papel pode ser analisado de acordo com os seguintes critérios: propriedades mecânicas de resistência, propriedades ópticas, propriedades de textura, e propriedades elétricas. A umidade e temperatura podem influenciar as quatro propriedades citadas anteriormente.

As propriedades elétricas do papel (carga elétrica e constante dielétrica) estão ligadas a utilização específica de cada tipo de papel e são cada vez mais controladas pelos processos de fabricação.

Para utilização do papel no desenvolvimento de meta-papéis, é necessário estudar as características elétricas do papel que são mais importantes para esta aplicação. É preciso saber quais são os papéis que podem ser utilizados como substrato e analisar suas características dielétricas.

A constante dielétrica ou permissividade relativa de um material (ϵ_r) é definida pela razão entre a permissividade do material (ϵ) e a constante dielétrica do ar (ϵ_0).

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (8.1)$$

Quando uma onda eletromagnética percorre um material dielétrico, sua velocidade de propagação é reduzida, funcionando como se a onda possuísse um comprimento de onda menor que o comprimento de onda real do sinal.

Elétricamente, a constante dielétrica é uma relação da quantidade de energia estocada em um material isolante. Para os campos variantes no tempo, a constante dielétrica é dependente da frequência.

Realizou-se uma pesquisa sobre os tipos de papel e também sobre a constante dielétrica de cada tipo de papel. A tabela a seguir apresenta os valores encontrados para as constantes dielétricas de diferentes tipos de papel.

Os valores observados para a constante dielétrica relativa dos diversos tipos de papel estão compreendidos entre 1,5 e 5. Segundo Bowick [10] a constante dielétrica para o papel na faixa de RF é definida como sendo $\epsilon_r = 4$, este valor teórico foi utilizado nas simulações que serão apresentadas posteriormente. A temperatura e umidade foram desconsideradas nas simulações apesar das mesmas influenciarem os valores de resistividade do papel.

Tabela 2 – Constante dielétrica de alguns tipos de papel.

Tipo de papel	Constante dielétrica ϵ_r
Papel seco	1,5 a 3
Papel com parafina	2,5 a 4
Cartolina	3 a 5
Papel com baquelita	5

Outra característica importante do papel que deve ser considerada no desenvolvimento de meta-papéis. Temos como exemplos de espessuras os valores de $100\mu\text{m}$ para o papel comum e $200\mu\text{m}$ para a cartolina. O valor utilizado como padrão para as simulações foi de $200\mu\text{m}$.

8.1. O Conceito de Meta-papel

Os Meta-papéis são metamateriais desenvolvidos em um substrato composto de papel, ou seja, materiais condutores são depositados sobre uma camada de papel que funciona como substrato, de forma a obter um material que apresenta valores negativos de constante dielétrica e permeabilidade.

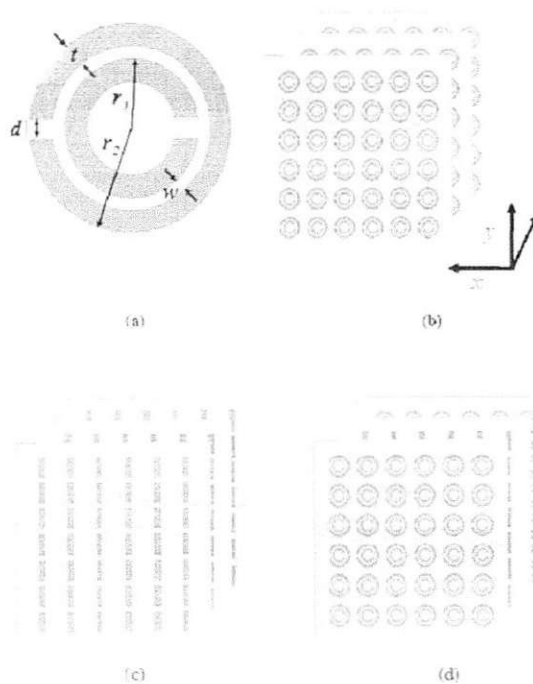


Figura 18- Composição das camadas do Meta-papel.

A figura acima mostra a configuração das camadas que compõem um meta-papel. O princípio de composição de um metamaterial é aplicado ao substrato de papel para obter o meta-papel. Nas figuras 18(b) e 18(c) são observadas as camadas compostas pelos anéis ressonantes e as linhas

respectivamente. Na figura 18(d) observa-se como é feita a sobreposição das camadas.

As possíveis aplicações para os meta-papéis são muito interessantes, pois estes metamateriais podem ser utilizados em aplicações onde existe a necessidade de se desenvolver dispositivos com características como a flexibilidade, pequenas dimensões e espessura. Os meta-papéis podem também ser utilizados em dispositivos já existentes desenvolvidos atualmente em materiais tradicionais. A utilização do papel provavelmente permitirá uma redução dos custos, visto que o papel, em geral, é um material mais barato e mais acessível.

9. CST MICROWAVE STUDIO

Para realização das simulações que serão apresentadas posteriormente neste relatório, foi utilizado o programa CST Microwave Studio[®]. Este programa permite realizar simulações de campos eletromagnéticos em estruturas 3D. Nos processos de simulação são utilizadas diferentes técnicas de simulação: Transient Solver, Frequency Domain Solver, Eigenmode Solver e Modal Analysis Solver.

O programa é baseado na Teoria da Técnica de Integração Finita (FIT – Finite Integration Technique) para as simulações eletromagnéticas em geral. Esta técnica utiliza uma representação discreta das Equações de Maxwell como base para os cálculos. A técnica FIT aplicada a uma malha cartesiana no domínio do tempo é uniformemente equivalente ao método padrão FDTD (Finite Difference Time Domain).

Para aplicações eletromagnéticas em alta frequência, os métodos de simulação no domínio do tempo são altamente desejados, principalmente quando se deseja obter resultados dentro de uma larga faixa de frequências. O método de simulação FIT possui então propriedades vantajosas: requer uma baixa quantidade de memória e um algoritmo eficaz. Este método combinado com uma perfeita aproximação da fronteira (PBA – Perfect Boundary Approximation) permite uma modelagem precisa de estruturas curvas.

10. SIMULAÇÕES

As simulações realizadas foram baseadas nos modelos de metamateriais encontrados em diferentes referências bibliográficas estudadas na primeira parte do estágio. Primeiramente foram simuladas células unitárias de diversos modelos de metamateriais tomando como base os valores das dimensões indicadas nas referências para que fossem observados os resultados obtidos e o comportamento meta-material de cada estrutura.

Num segundo momento foram utilizadas as referências encontradas para o papel para substituir o substrato original dos modelos por um substrato de papel modificando também a espessura do substrato e a constante dielétrica para cada tipo de papel. Para finalizar foram simuladas estruturas em 2D formadas por células unitárias utilizadas anteriormente.

O modo de solução utilizado para todas as simulações foi o Transient Solver. O material condutor foi definido como PEC (Perfect Electric Conductor). As Portas utilizadas possuem uma impedância característica igual a 50Ω .

O tipo de malha utilizada foi PBA (Perfect Boundary Approximation) com uma densidade de aproximadamente 25 linhas por comprimento de onda para obter uma boa aproximação. As condições de contorno utilizadas nas simulações foram as mesmas para todas as simulações: as fronteiras superior e inferior são definidas como PEC; as fronteiras a direita e a esquerda foram definidas como PMC (Perfect Magnetic Conductor) e as fronteiras dianteiras e traseira foram definidas como abertas (Open add space). As portas foram colocadas nos locais de fronteira aberta, de maneira a ficarem perpendiculares ao eixo x.

A partir das simulações realizadas foram obtidos gráficos dos parâmetros S para cada uma das estruturas simuladas. Analisando estes gráficos e tomando os valores dos parâmetros S_{11} S_{21} podemos encontrar os parâmetros materiais ϵ e μ

utilizando uma modificação das aproximações de Nicolson, Ross e Weir [9]. As equações para o cálculo da constante dielétrica e da permeabilidade são apresentadas a seguir.

$$\varepsilon \approx \frac{2}{ik_0 d} \frac{1-V_1}{1+V_1} \quad (8.1)$$

$$\mu \approx \frac{2}{ik_0 d} \frac{1-V_2}{1+V_2} \quad (8.2)$$

onde V_1 e V_2 são obtidos através das equações:

$$V_1 = S_{21} + S_{11} \quad (8.3)$$

$$V_2 = S_{21} - S_{11} \quad (8.4)$$

e k_0 é o número de onda definido pela seguinte equação

$$k_0 = \frac{\omega}{c} \quad (8.5)$$

Esta aproximação para os valores de ε e μ pode ser utilizada quando se tem os valores dos parâmetros S_{11} e S_{21} próximos de zero e da unidade respectivamente.

10.1. Anéis Ressonantes

As principais estruturas simuladas são mostradas nesta seção, outras estruturas simuladas são também apresentadas no Anexo B.

A estrutura da Figura 19 apresentada abaixo é uma célula unitária de um metamaterial simulada no CST[®]. Esta célula é constituída de dois anéis ressonantes de dimensões $r_1 = 1,31mm$ e $r_2 = 0,76mm$, uma linha de material condutor situada na outra face do substrato. A largura das linhas condutoras utilizadas é $d = 0,25mm$ e o material utilizado para simulação é o PEC (Perfect Electric Conductor) um condutor perfeito que não apresenta perdas.

Para o substrato utilizou-se uma espessura $h = 0,2mm$ e uma constante dielétrica $\epsilon = 4$. Outras dimensões são indicadas na Figura 19.

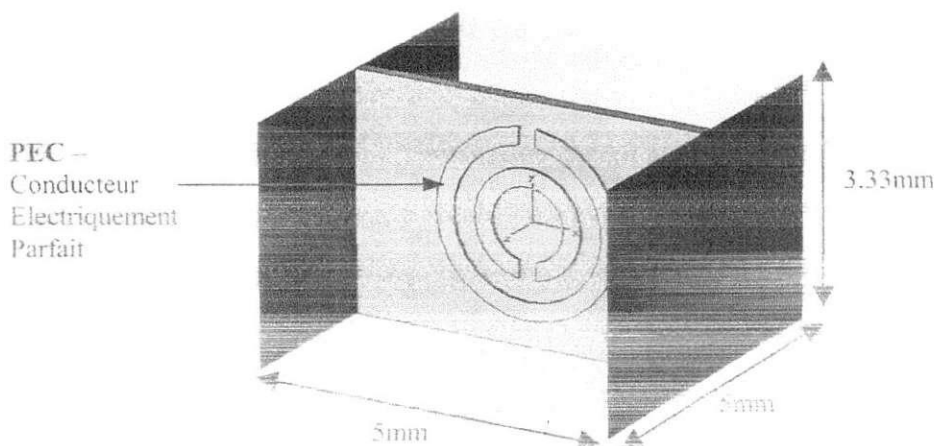


Figura 19- Célula unitária formada por dois anéis ressonantes concêntricos.

Na Figura 20 estão representados os parâmetros S obtidos na simulação para esta estrutura. Observando-se o gráfico, temos que a estrutura tem o comportamento de um passa banda entre as frequências de 12,5 GHz e 23,8

GHz. Nas simulações também foi possível observar a distribuição do campo na estrutura.

Para a frequência de 17,46 GHz calculou-se os valores de ϵ e μ a partir dos parâmetros S retirados do gráfico. Para esta frequência temos $\epsilon = -0.02$ e $\mu = -0.07$.

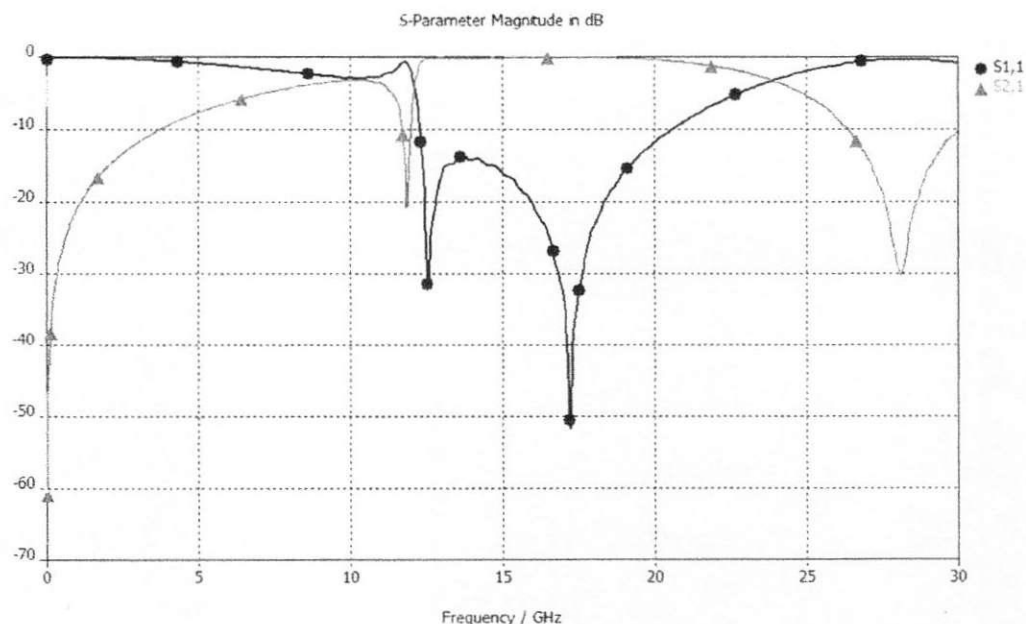


Figura 20- Parâmetros S para os anéis ressonantes.

A estrutura apresentada abaixo é uma composição de células unitárias dispostas linearmente. As dimensões de cada célula unitária permanecem iguais as da célula unitária exposta anteriormente.

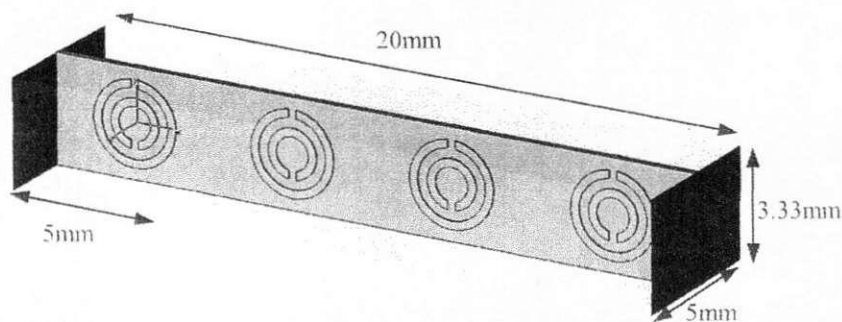


Figura 21- Composição de células unitárias dos anéis ressonantes.

Para esta estrutura obteve-se uma banda passante entre 12,4 GHz e 21,3 GHz, sendo esta próxima da banda obtida anteriormente para uma única célula unitária. A composição de células unitárias não modifica muito a banda passante da estrutura. Observa-se oscilações para o parâmetro S_{21} , isto se deve ao fato de o material possui características de um material tradicional das variações do material que possui ora características de um material convencional (RH) ora características de um metamaterial (LH).

Os valores obtidos para ϵ e μ calculados a partir dos parâmetros S obtidos no gráfico da Figura 22 são próximos dos valores obtidos para uma célula unitária, $\epsilon = -0.02$ e $\mu = -0.07$ para uma frequência de 17 GHz.

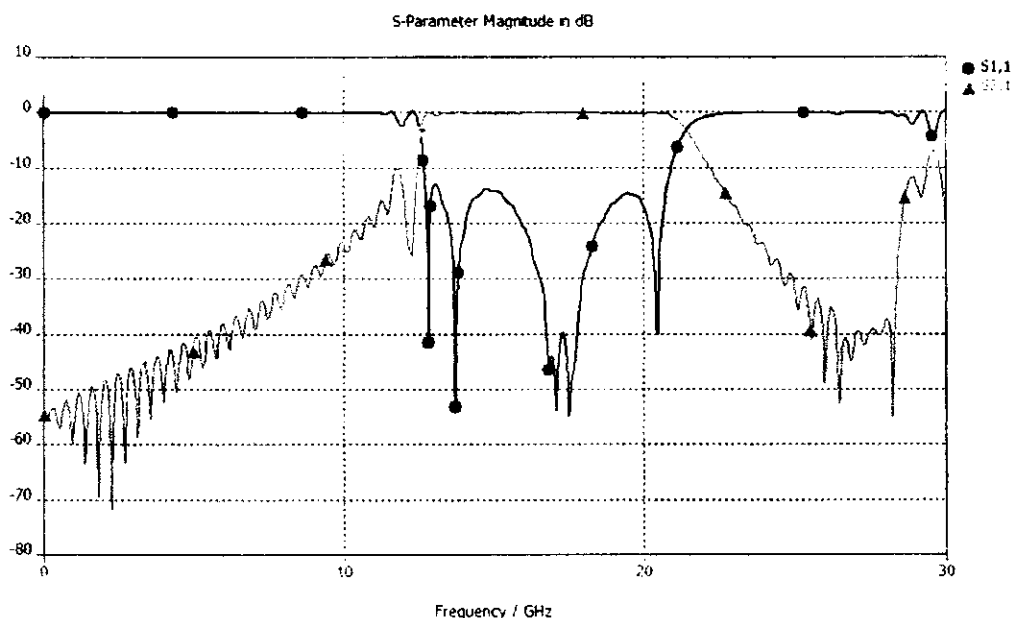


Figura 22- Parâmetros S para a composição de células unitárias dos anéis ressonantes.

A Figura 23 exibe a concentração do campo na estrutura dos anéis ressonantes.

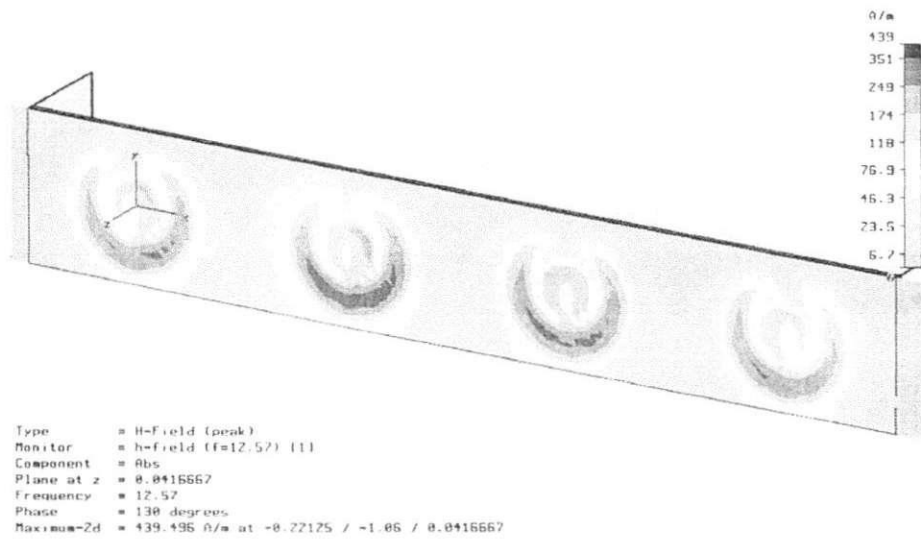


Figura 23- Distribuição do campo magnético na estrutura dos anéis ressonantes.

10.2. Estrutura de Quadrados Ressonantes

A Figura 24 representa uma célula unitária formada por quadrados. As características do substrato são as mesmas utilizadas na simulação anterior. L_1 e L_2 são os comprimentos das linhas do quadrado externo e interno respectivamente. Para a frequência de 14,16 GHz os parâmetros calculados a parti do gráfico da Figura 25 foram $\epsilon = -0,07$ e $\mu = -0,132$.

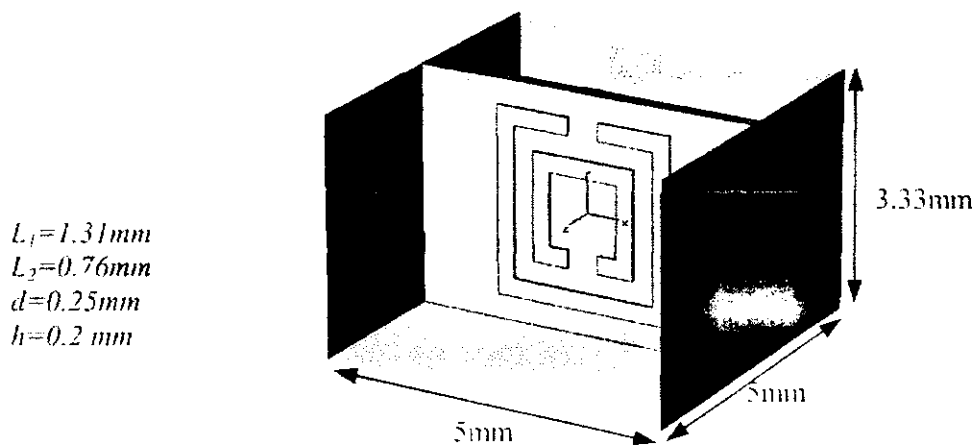


Figura 24- Célula unitária para uma estrutura quadrada.

Os parâmetros S são apresentados na Figura 25. A banda passante observada neste caso esta situada entre 10,6 GHz e 20,7 GHz. Segundo as pesquisas realizadas, as dimensões das fendas e a separação entre os anéis é que determinam a banda passante para estas estruturas. Foi determinado para as estruturas simuladas que as dimensões das fendas e separação entre os anéis seriam mantidos constante.

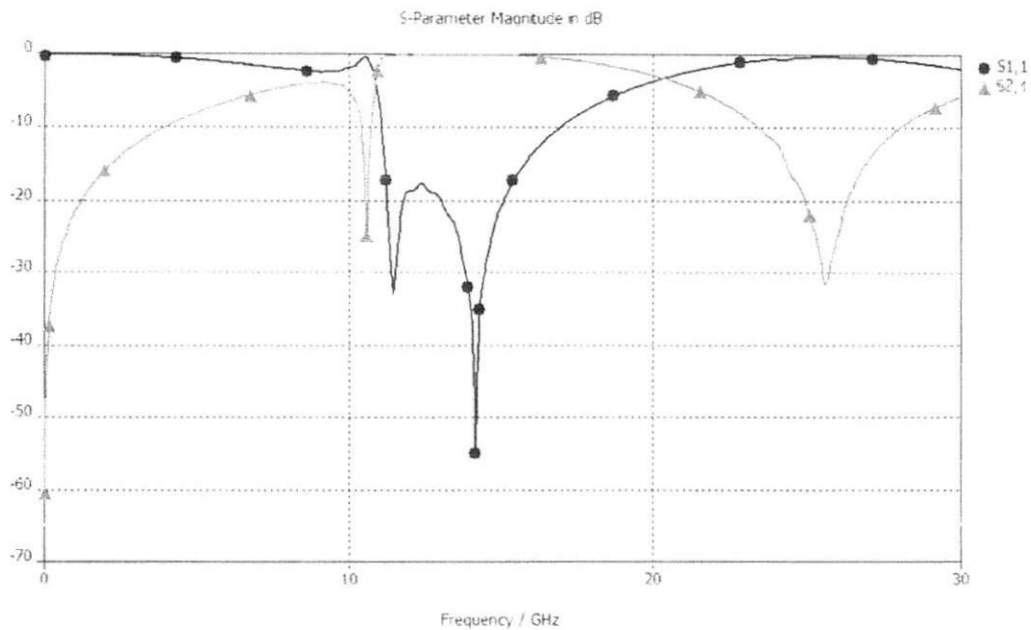


Figura 25- Parâmetros S para a estrutura quadrada.

A estrutura apresentada a seguir é uma composição de células unitárias quadradas. As dimensões de cada célula forma mantidas constantes.

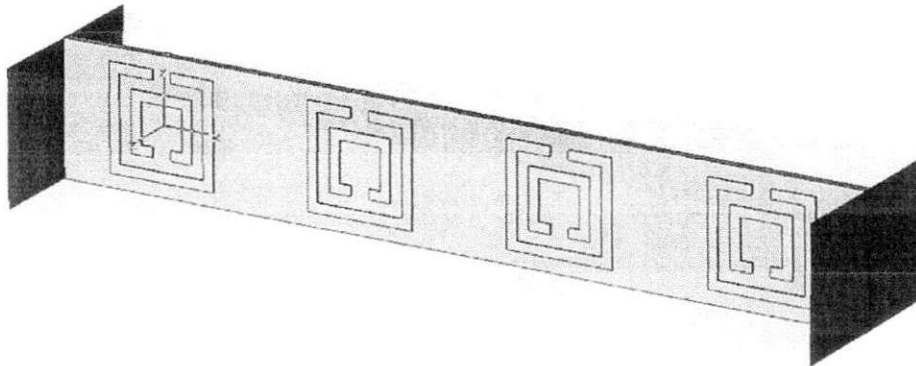


Figura 26- Composição de células unitárias dos quadrados ressonantes.

O gráfico dos parâmetros S mostra uma banda passante entre 10,53 GHz e 18,16 GHz. Observa-se que a frequência mais alta foi reduzida em relação à frequência máxima obtida para a célula unitária quadrada. Os valores calculados para a frequência de 11,73 GHz foram $\epsilon = -0,19$ e $\mu = -9,67$.

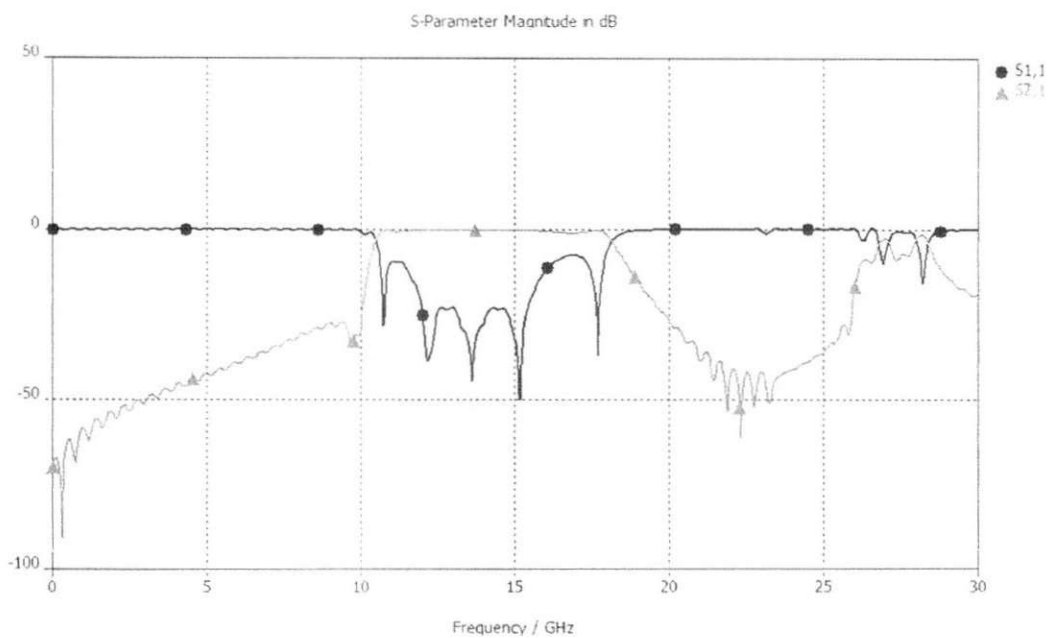


Figura 27- Parâmetros S para a composição das células unitárias quadradas.

10.3. Anéis Simétricos

A Figura 28 representa a célula unitária simétrica simulada. As dimensões utilizadas são apresentadas junto da figura. L_1 é o comprimento horizontal dos anéis e L_2 é a medida do comprimento vertical dos anéis simétricos.

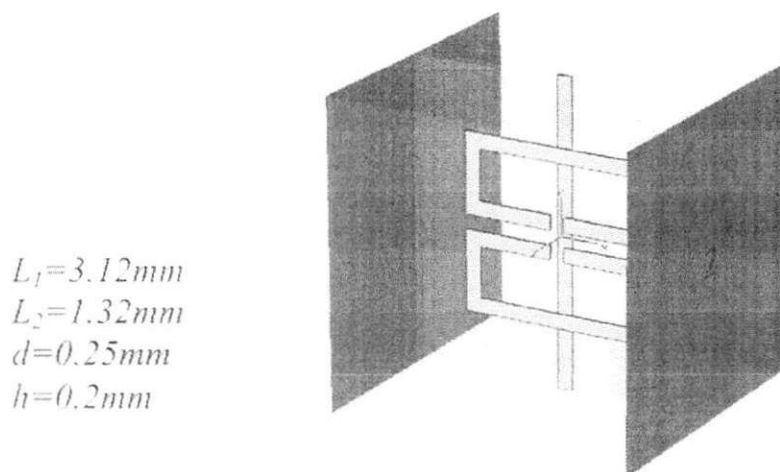


Figura 28- Célula unitária para a estrutura simétrica.

Esta estrutura apresenta uma banda passante entre 11,8 GHz e 25 GHz. A banda observada é a maior entre todas as estruturas simuladas. Para a frequência de 20,73 GHz a estrutura possui $\epsilon = -0,0432$ e $\mu = -0,2309$.

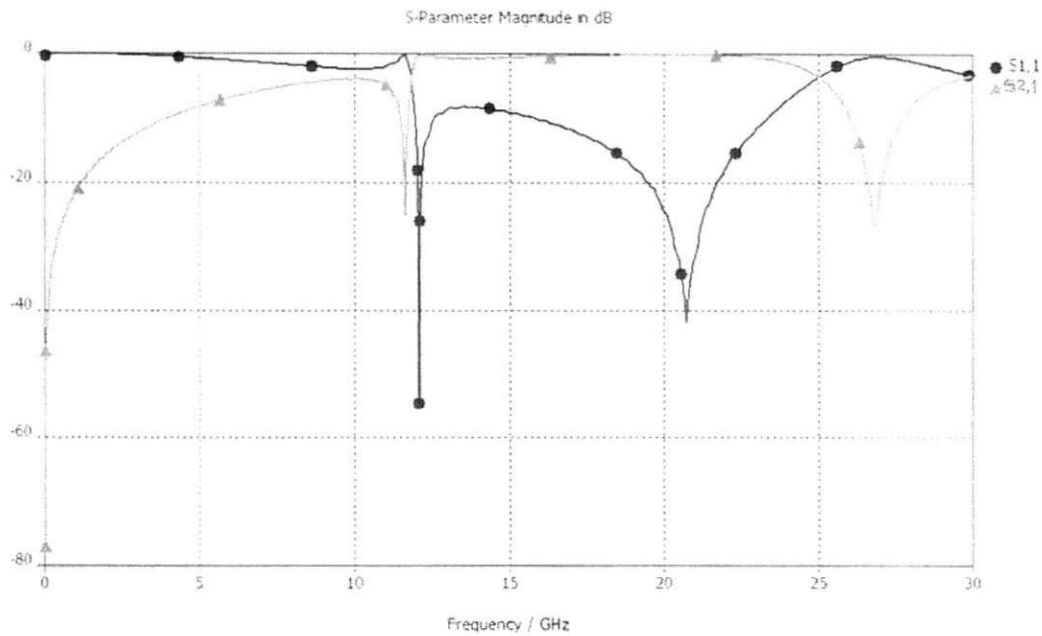


Figura 29- Parâmetros S para uma célula unitária.

Quando se compõe uma estrutura a partir de células simétricas se obtém para esta nova estrutura uma banda passante entre 12,7 GHz e 22,3 GHz. Observam-se ainda oscilações do parâmetro S_{21} devido à mudança das características do material que se comporta tanto como um metamaterial (LH) como um material tradicional (RH).

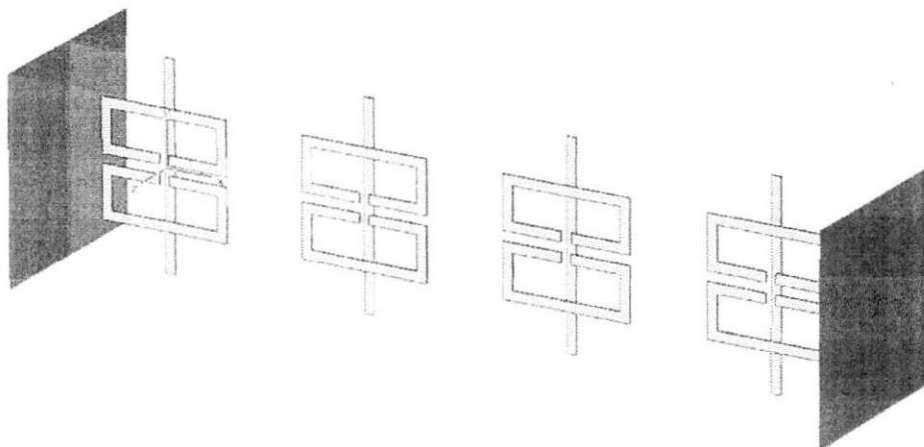


Figura 30- Composição de células unitárias simétricas.

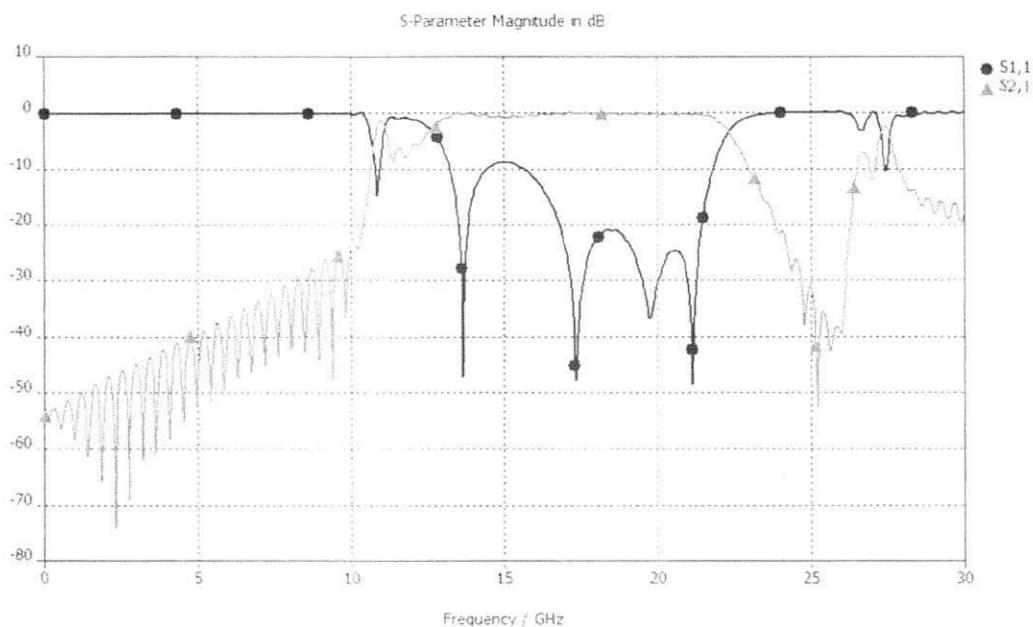


Figura 31- Parâmetros S para a composição de células unitárias simétricas.

Observa-se também uma transmissão em torno de 10,9 GHz, para esta frequência a estrutura apresenta também características de um metamaterial com $\epsilon = -1,7035$ e $\mu = -12,46$ simultaneamente negativos.

10.4. Estrutura Ômega

Esta célula unitária é composta de duas estruturas em forma de ômega dispostas em cada face do substrato de forma a ficarem com as fendas em posições opostas. As dimensões da estrutura são mostradas a seguir na Figura 32.

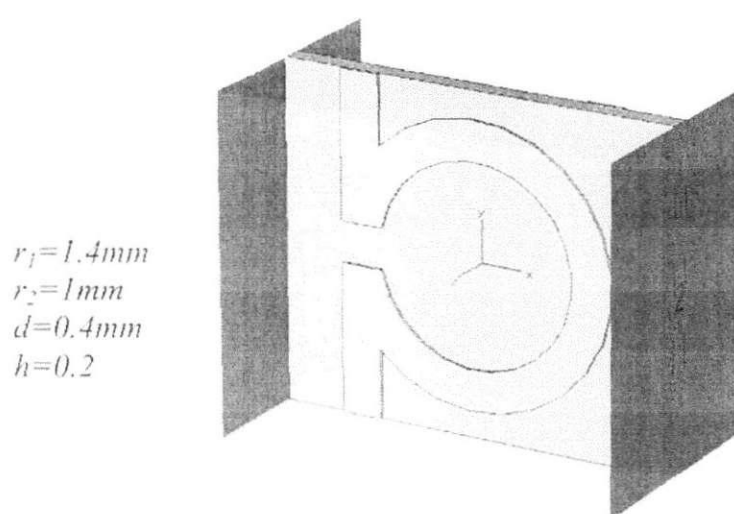


Figura 32- Célula unitária de uma estrutura ômega.

Diferentemente das outras estruturas simuladas, esta estrutura apresenta duas bandas de transmissão uma em torno de 10,5 GHz e outra em 20,3 GHz como esta mostrado no gráfico a seguir.

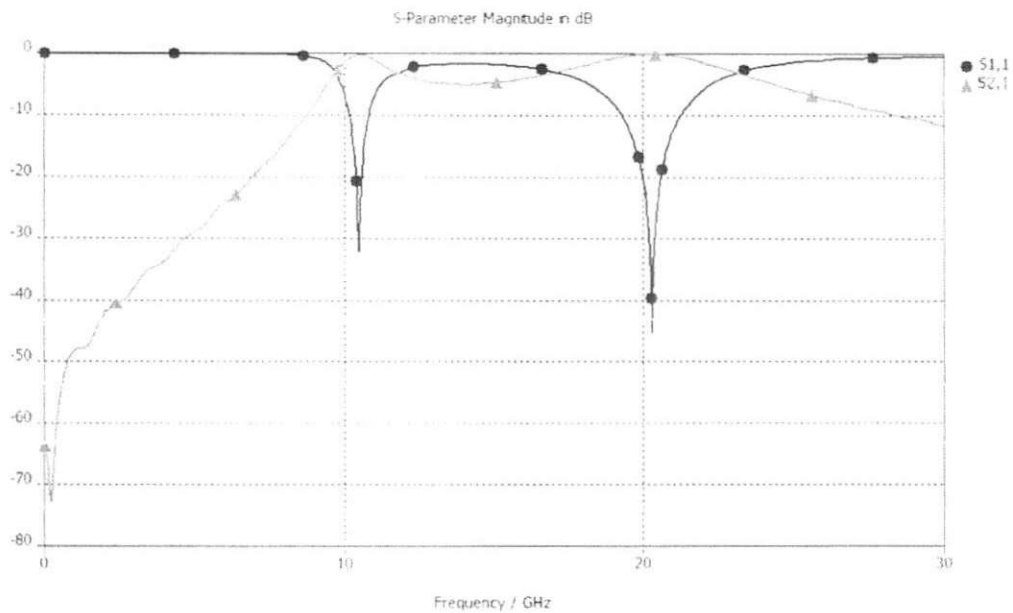


Figura 33- Parâmetros S para a célula unitária ômega.

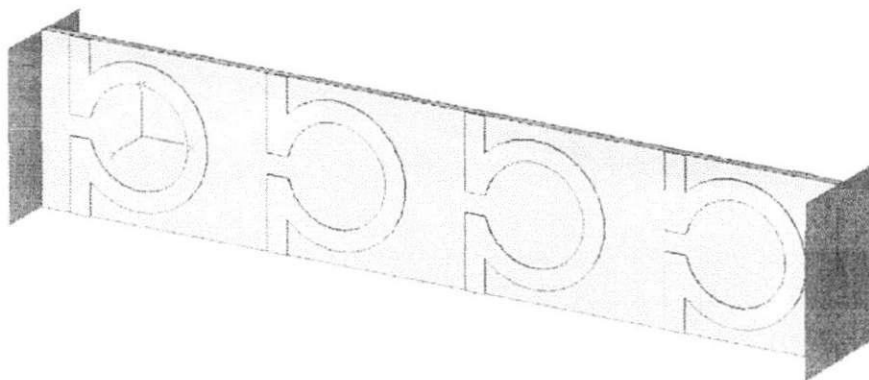


Figura 34- Composição de células unitárias da estrutura ômega.

Para a composição de células unitárias obtêm-se ainda duas bandas nas frequências anteriores. Observa-se também a presença de oscilações como nas estruturas compostas simuladas anteriormente.

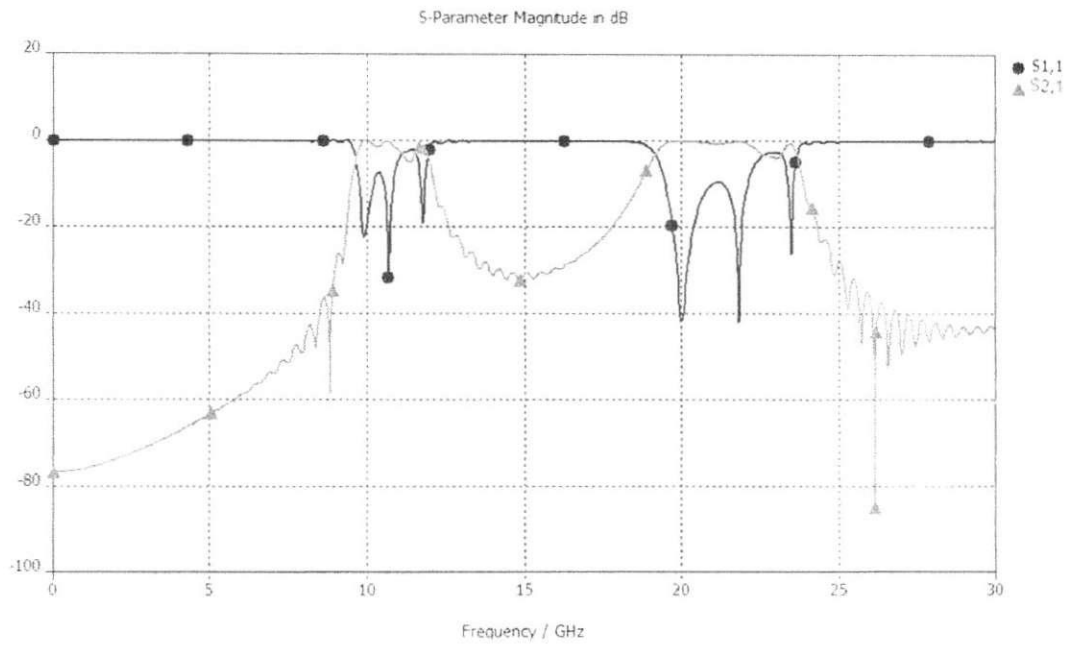


Figura 35- Parâmetros S para a composição de células unitárias simétricas.

As características metamateriais para esta estrutura são obtidas para uma frequência de 11,97 GHz, neste caso tem-se $\epsilon = -0,02$ e $\mu = -0,07$.

11. CONCLUSÃO

Neste relatório abordou-se o conceito de um novo metamaterial que pode ser desenvolvido utilizando o papel como substrato. Os metamateriais são materiais que possuem propriedades especiais que podem ser utilizadas para obter dispositivos com melhor desempenho e com diferentes características em relação aos dispositivos tradicionais.

Observou-se através dos estudos realizados que os metamateriais podem ser desenvolvidos utilizando a teoria de linhas de transmissão para encontrar um modelo equivalente que pode ser utilizado para o projeto destas estruturas utilizando tanto componentes discretos como circuitos planares.

Existem diversos dispositivos que utilizam as características do metamaterial para obtenção de uma melhor resposta, ou mesmo para obter características não habituais como um índice de refração negativo ou próximo e zero.

Os meta-papéis são uma nova categoria de metamateriais que começaram a ser estudados. A utilização do papel como substrato permitirá a obtenção de dispositivos com características como pequena espessura e flexibilidade, isto permitirá novas aplicações para os metamateriais.

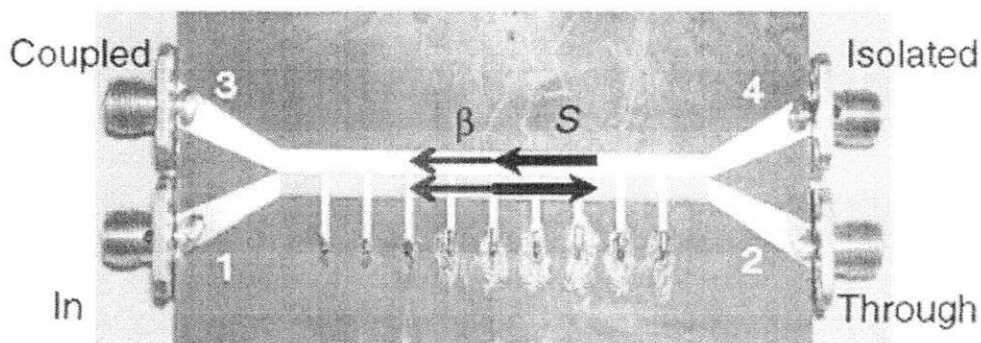
As simulações realizadas dão uma idéia da viabilidade dos meta-papéis e da possibilidade de utilização do papel como substrato. Como as simulações utilizam valores aproximados de constante dielétrica e espessura do papel, elas funcionam como um ponto de partida para novas pesquisas que serão desenvolvidas sobre este assunto.

Os valores obtidos através de cálculos para a constante dielétrica e permeabilidade a partir dos parâmetros S são negativos mais ainda são muito próximos de zero. Seria necessária uma modificação das dimensões das

estruturas para obter valores maiores para os parâmetros ϵ e μ . Como as aproximações para os cálculos destes parâmetros foram obtidas na etapa final do estágio, não houve tempo suficiente para modificar as estruturas e realizar novas simulações e análises.

13. ANEXOS

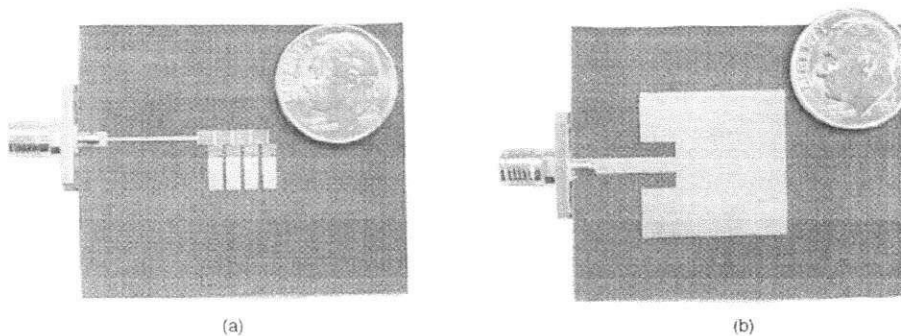
Anexo A: Modelos e Aplicações de Metamateriais



C. Caloz and T. Itoh, "Composite Right/Left-Handed transmission Line Metamaterials"

Figura A1- Acoplador LH.

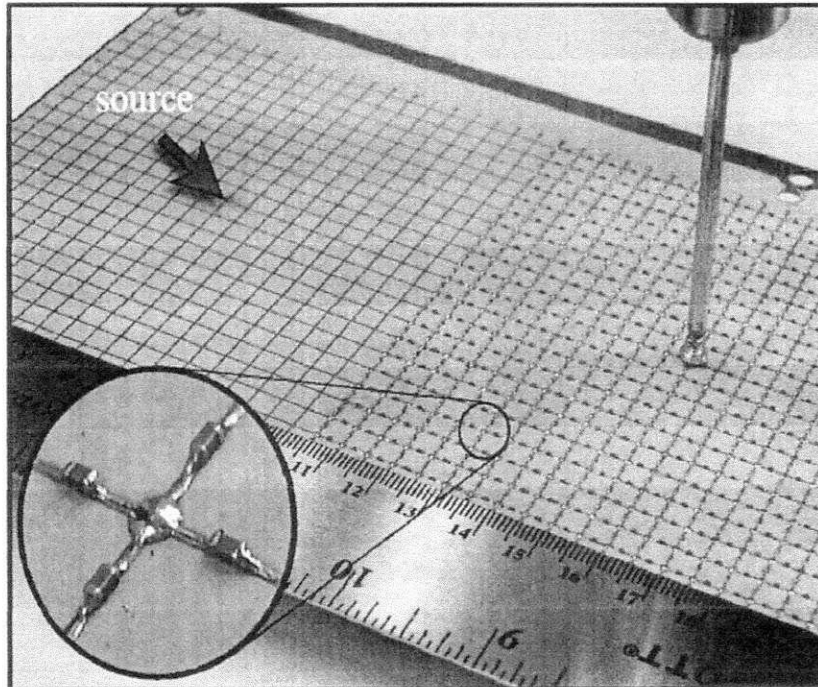
O acoplador mostrado na figura acima possui uma linha com características metamateriais. A onda que se propaga nesta linha possui oposição entre a direção de propagação e o vetor de Poynting.



C. Caloz and T. Itoh, "Composite Right/Left-Handed transmission Line Metamaterials"

Figura A2- Antenas com de mesma frequência f_0 .

A Figura A2 mostra (a) uma antena de frequência f_0 com capacitâncias que produzem a característica metamaterial LH. Na figura (b) uma antena patch para a mesma frequência f_0 mas que não possui características metamateriais. Observa-se a diferença de dimensões entre as antenas já que estas possuem a mesma frequência de trabalho.



G. V. Eleftheriades, "Negative-Refractive-Index Metamaterials using loaded TL and enabling Microwave devices"

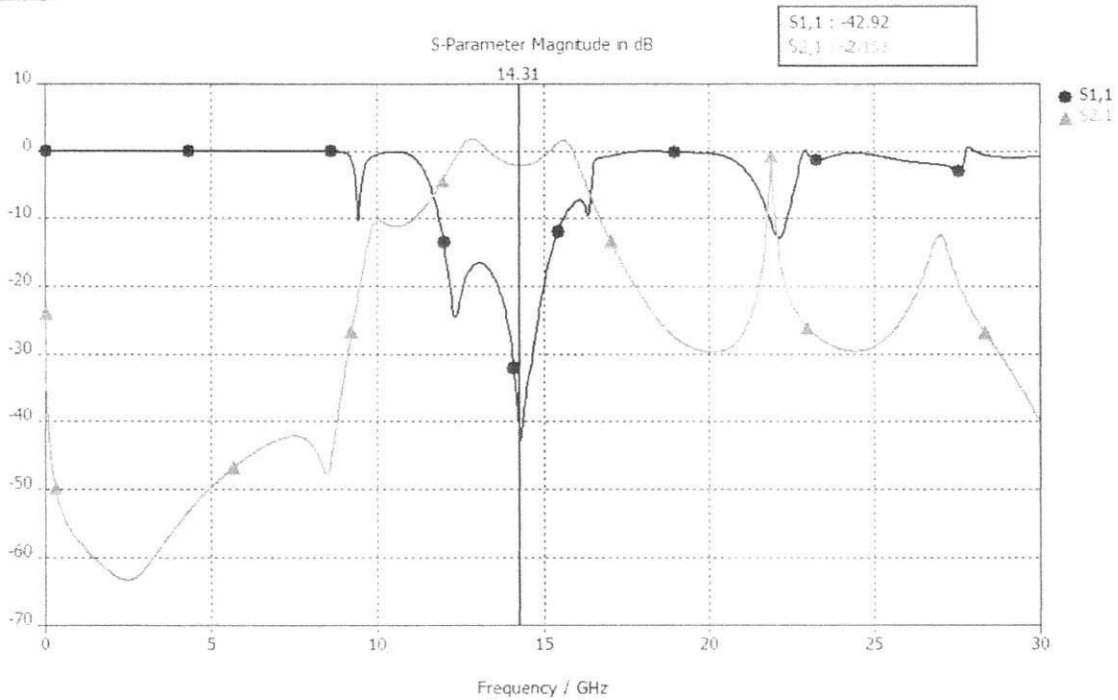
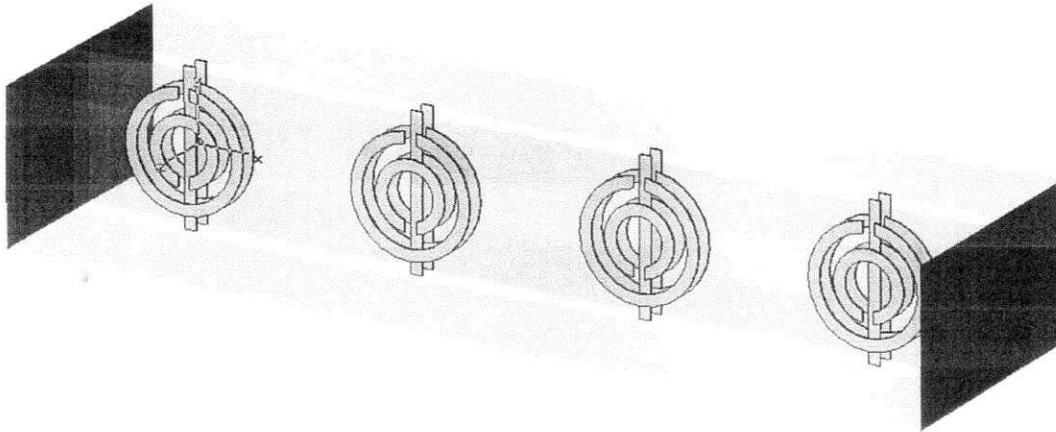
Figura A3- Lente Metamaterial com componentes discretos.

A esta lente utiliza componentes discretos como capacitores e indutores arranjados de forma a obter características metamateriais. O índice de refração para esta lente é negativo $\eta < 0$.

Anexo B: Outras Estruturas Simuladas

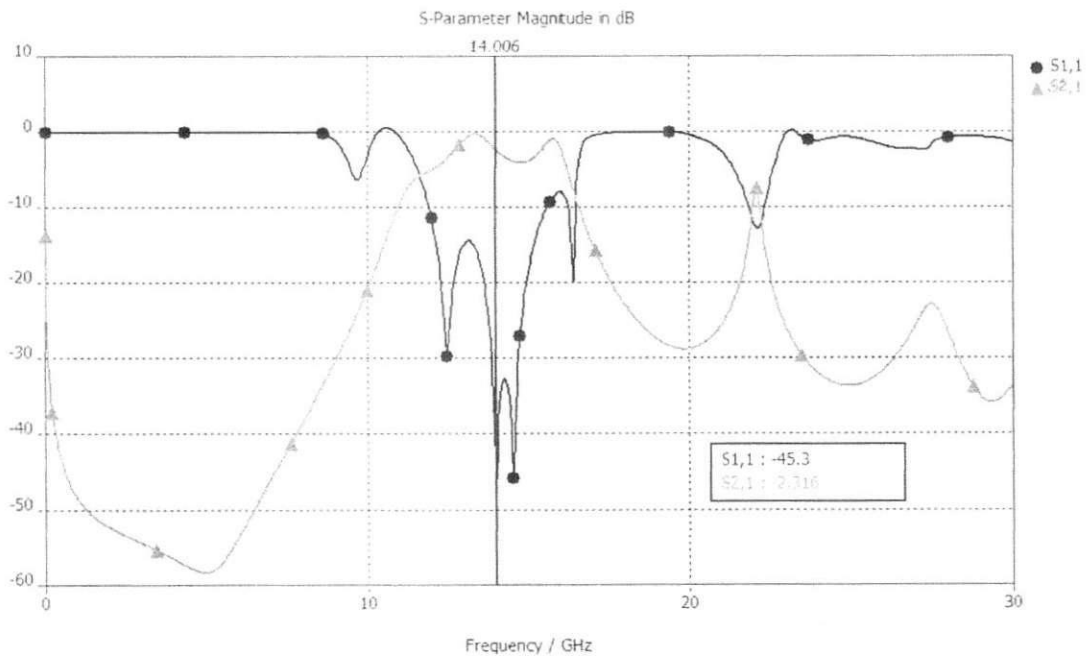
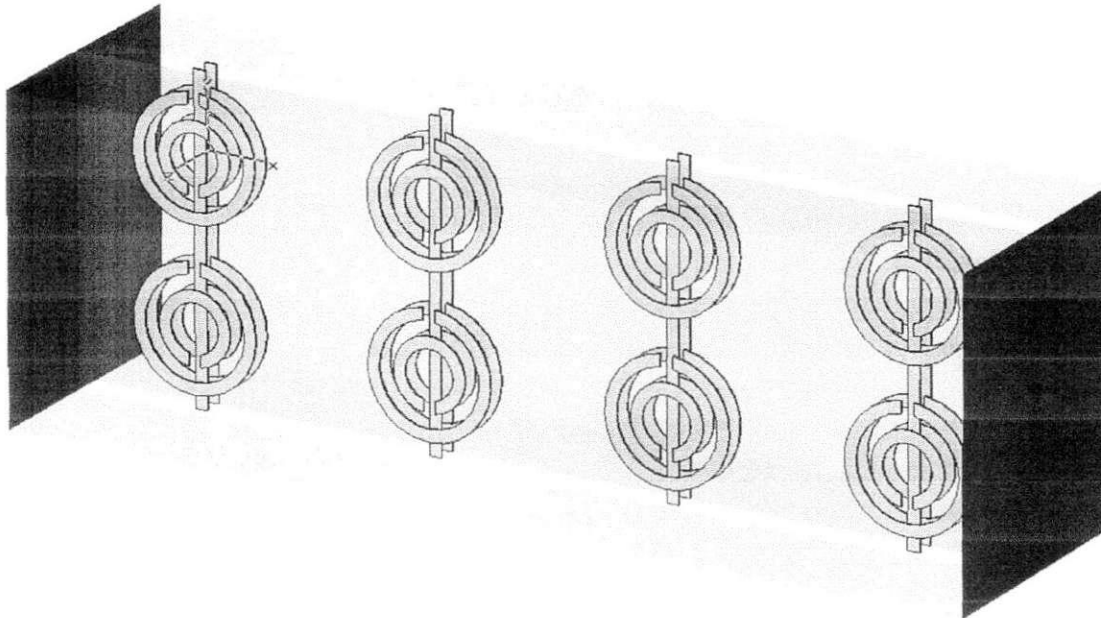
Anéis Ressonantes – Duas camadas

$$f = 14.31 \text{ GHz} \rightarrow \epsilon = -1.979, \quad \mu = -2.130$$



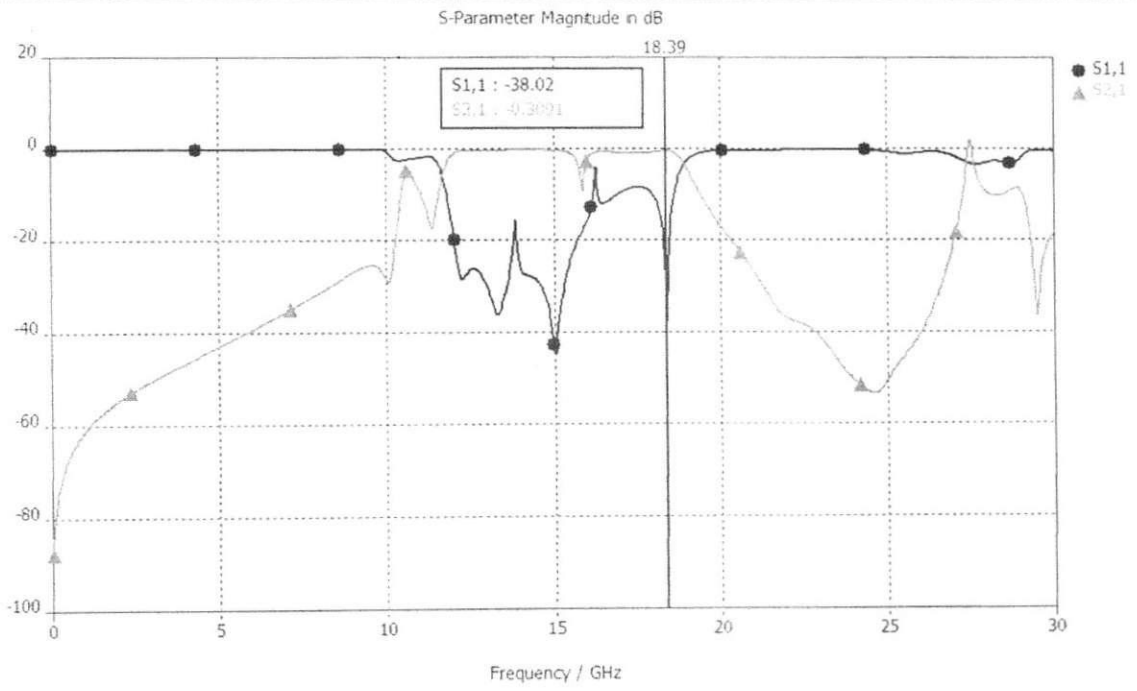
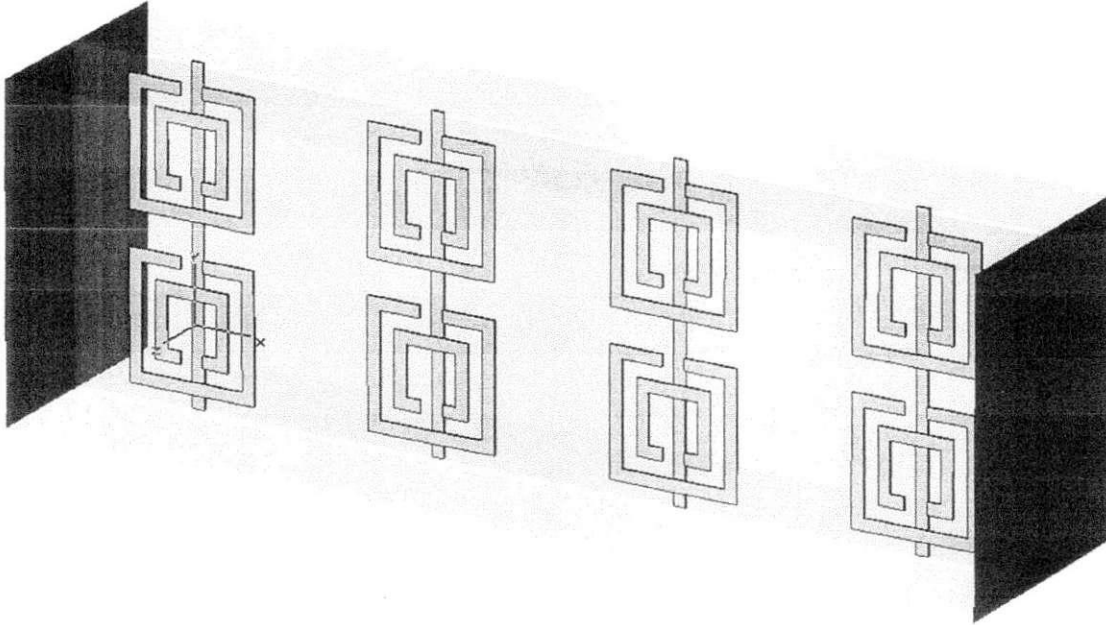
Anéis Ressonantes – Duas camadas e dois níveis

$f = 14 \text{ GHz} \rightarrow \epsilon = -2.1993, \quad \mu = -2.3203$



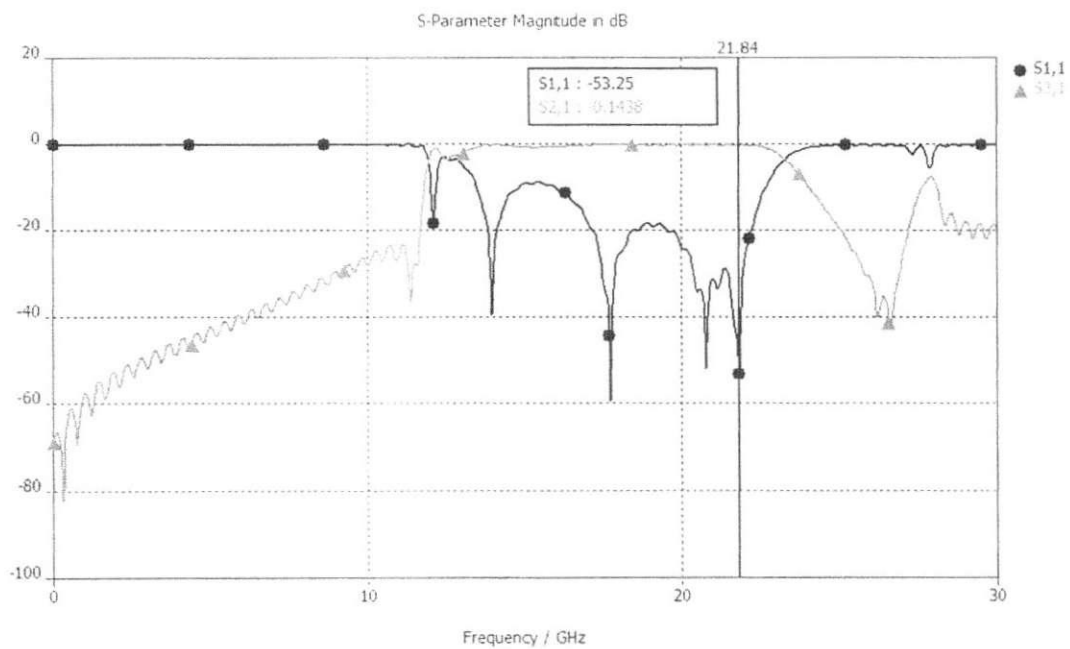
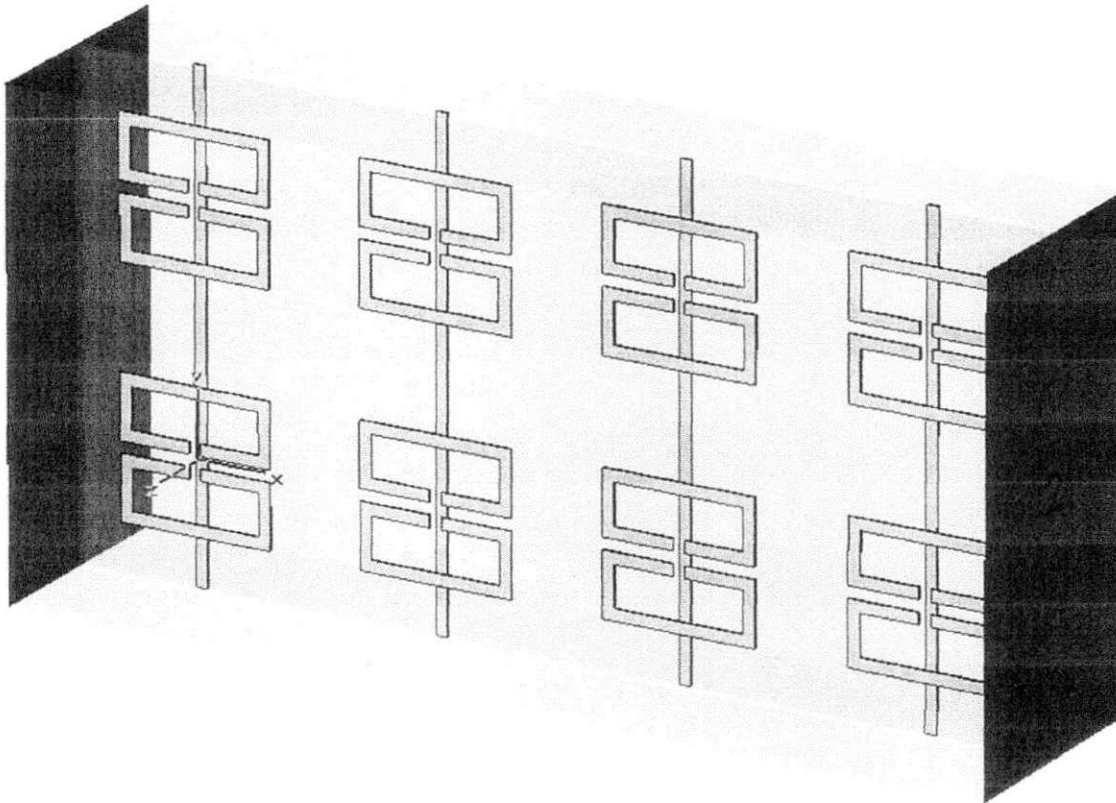
Quadrados Ressonantes – Dois níveis

$f = 18.39 \text{ GHz} \rightarrow \epsilon = -0.2947, \quad \mu = -0.6323$



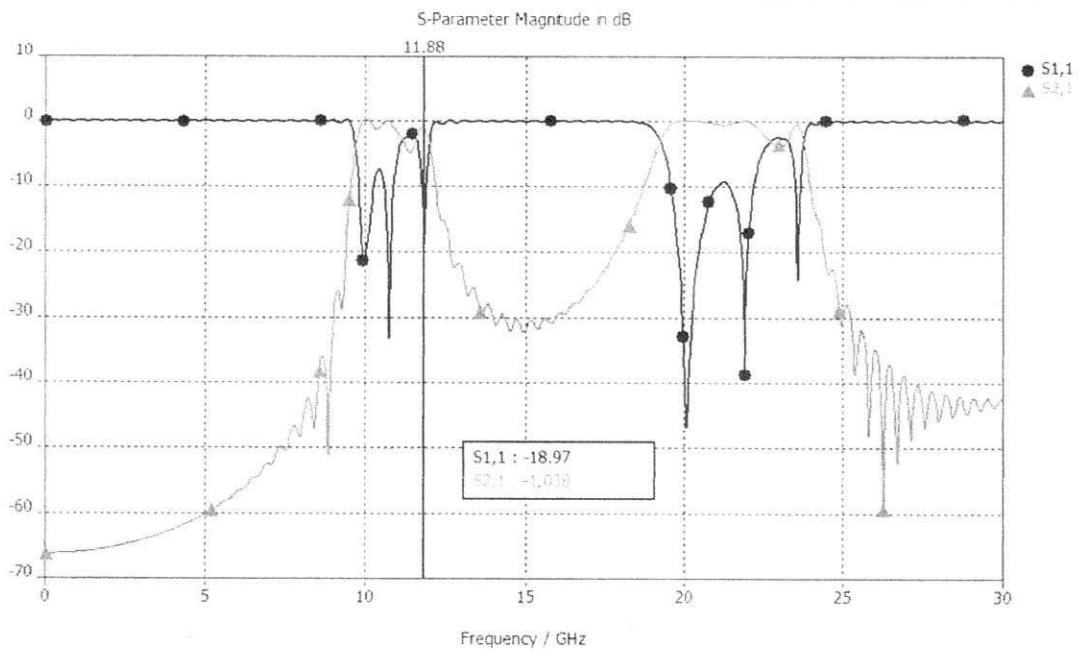
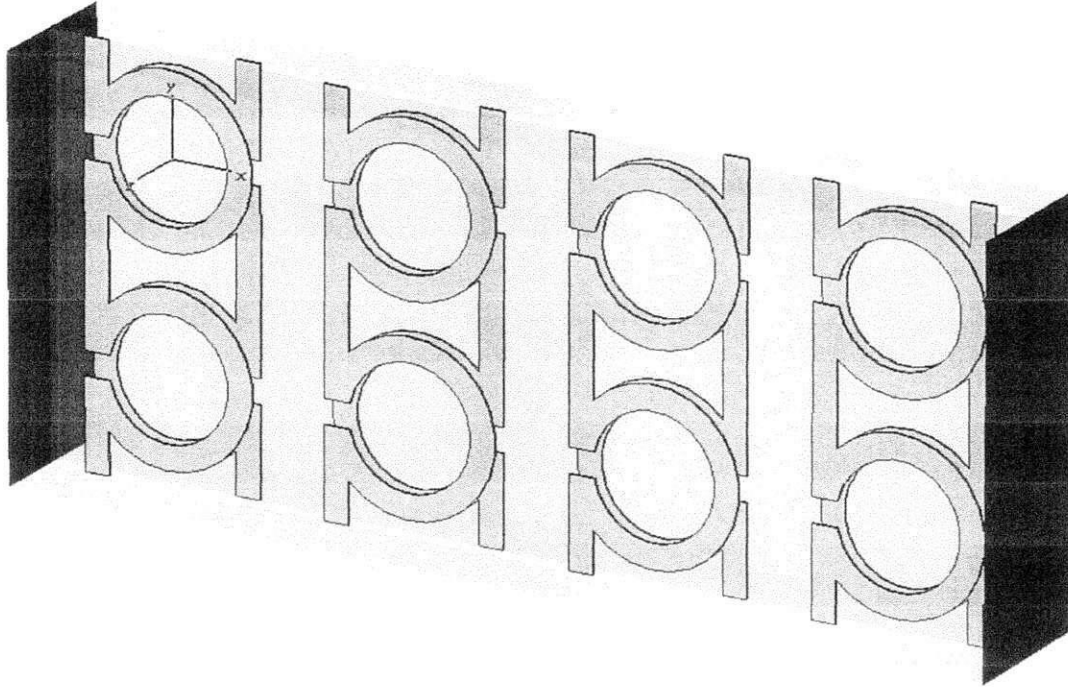
Anéis Simétricos – dois níveis

$f = 21.84 \text{ GHz} \rightarrow \epsilon = -0.1564, \quad \mu = -0.2052$



Estrutura Ômega – dois níveis

$f = 11.88 \text{ GHz} \rightarrow \epsilon = -0.002, \quad \mu = -5.1022$



12. BIBLIOGRAFIA

- [1] V. G. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ," Sov. Phys. Uspekhi, vol. 10, no. 4, pp.509-514, Jan.-Feb. 1966.
- [2] J. B. Pendry, "Negative refraction makes a perfect lens," Phys. Rev. Lett., vol. 85, no. 18, pp. 3966-3969, Oct. 2000.
- [3] D. R. Smith and N. Kroll, "Negative refractive index in left-handed materials," Phys. Rev. Lett., vol. 85, no. 14, pp. 2933-2936, Oct. 2000.
- [4] C. Caloz and T. Itoh, "Composite Right/Left-Handed Transmission Line Metamaterials," IEEE Microwave Magazine, pp.34-50, Sep.2004.
- [5] I. Shadrilov and Y. Kivshar, "Bending Waves in a Wrong Way," the Physicist, vol. 41, no. 4, pp. 137-141, Jul.-Aug. 2004.
- [6] I. Bulu, H. Caglayan, K. Aydin and E. Ozbay, " Compact size highly directive antennas based on the SRR metamaterial medium," New J. Physics, vol. 7, Oct. 2005.
- [7] *Characterization of Left-Handed Materials*, Notas de curso Massachusetts Institute of Technology.
- [8] J. B. Pendry, D. R. Smith, "Reversing Light: Negative Refraction," Physics Today, Dec. 2003.
- [9] S. Antipov, W. Gai, W. Liu, J. Power, L. Spentzouris, "Design, fabrication and testing of left-handed metamaterials," Apr. 2005.
- [10] C. Bowick, "RF Circuit Design" Ed. Newnes, pp. 12, Feb. 1997.
- [11] <http://cerig.efpg.inpg.fr> – acessado em março de 2006.
- [12] <http://www.metamaterials.net> – acessado em março de 2006.

[13] <http://www.cst.com> – acessado em março de 2006.