



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E  
COMPUTAÇÃO

**ANTENAS DE MICROFITA COM PATCH  
SUPERCONDUTOR A 212 K**

HUGO MICHEL CAMARA DE AZEVEDO MAIA

**NATAL – RN  
JULHO DE 2010**



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E  
COMPUTAÇÃO

## Antenas de Microfita com Patch Supercondutor a 212 K

**Hugo Michel Camara de Azevedo Maia**

Orientador: Prof. Dr. Humberto César Chaves Fernandes

**Dissertação de Mestrado** apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação da UFRN (área de concentração: Telecomunicações) como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e Computação.

**Natal – RN  
09 Julho de 2010**

# **Antenas de Microfita com Patch Supercondutor a 212 K**

**Hugo Michel Camara de Azevedo Maia**

Dissertação de Mestrado aprovada em Julho de 2010 pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

---

*Orientador:* Prof. Titular Dr. Humberto César Chaves Fernandes - UFRN

---

*Membro externo da banca:* Prof. Dr. Elialdo Chibério da Silva

---

*Membro local da banca :* Prof. Dr. Laércio Martins de Mendonça

---

*Membro local da banca:* Prof. Ms. Roberto Ranniere Cavalcante de França

---

*Membro local da banca:* Prof. Ms. Leonardo Martins Caetano

## **Dedico**

Aos meus pais, Humberto Aquino e Ana Lúcia, que sempre me apoiaram e me deram uma sólida formação. Aos meus avós Hugo de Azevedo e Bertha Aquino, ao meu irmão Hudson e irmã Elaine que sempre estiveram presentes nos momentos da minha vida.

# Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me permitido a realização deste trabalho, por ter me dado força e esperança durante todos os momentos da minha existência.

Ao Prof. Dr. Humberto César Chaves Fernandes, Professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, por toda sua atenção e incentivo como orientador deste e de outros trabalhos.

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação da Universidade Federal do Rio Grande do Norte que contribuíram para minha formação durante este curso.

Aos amigos do programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Aline, Anderson, Humberto Dionísio, Kleber, Leonardo, Marinaldo Sousa, Roberto e a todos os demais que fazem parte do programa de iniciação científica do grupo Tecfoton.

# Resumo

Este trabalho tem como objetivo principal o estudo da aplicação de antenas de microfita com patch supercondutor e uso dos arranjos de fase linear e planar. Foi apresentado um estudo das principais teorias que explicam com clareza a supercondutividade. As teorias BCS, Equações de *London* e modelo dos Dois Fluidos são as teorias que dão suporte a aplicação dos supercondutores nas antenas de microfita. Os arranjos de fase foram analisados em configurações lineares e planares de suas antenas. Foram obtidos os fatores de arranjos para tais configurações e os critérios da fase e do espaçamento entre os elementos que compõe o arranjo, ao qual foram examinados com o objetivo de obter um lóbulo principal com alta diretividade e alto ganho. A antena utilizada tem como *patch* retangular o material supercondutor  $\text{Sn}_5\text{InCa}_2\text{Ba}_4\text{Cu}_{10}\text{O}_y$  foi analisada através do método da Linha de Transmissão Transversa (LTT), aplicado no domínio da transformada de *Fourier* (FTD). O LTT é um método de onda completa, que tem como regra a obtenção dos campos eletromagnéticos em termos das componentes transversais à estrutura. A inclusão do *patch* supercondutor é feita utilizando-se a condição de contorno complexa resistiva. São obtidos resultados da frequência de ressonância em função dos parâmetros da antena; diagramas de radiação do Plano-E e Plano-H para os arranjos de fase de antenas nas configurações lineares e planares para diferentes valores da fase e espaçamento entre os elementos.

Palavras-Chave: Antena – Microfita – LTT – Supercondutividade – Arranjo – HTS – Linear - Planar

# Abstract

This work has as main objective to study the application of microstrip antennas with patch and use of superconducting arrays of planar and linear phase. Was presented a study of the main theories that explain clearly the superconductivity. The BCS theory, Equations of London and the Two Fluid Model are theories that supported the implementation of the superconducting microstrip antennas. Arrangements phase was analyzed in linear and planar configuration of its antennas are reported factors such arrays to settings and criteria of phase and the spacing between the elements that make the arrayst was reviewed in order to minimize losses due to secondary lobes. The antenna used has a rectangular patch  $\text{Sn}_5\text{InCa}_2\text{Ba}_4\text{Cu}_{10}\text{O}_y$  the superconducting material was analyzed by the method of Transverse Transmission Line (TTL) applied in the field of Fourier transform (FTD). The TTL is a full-wave method, which has committed to obtaining the electromagnetic fields in terms of cross-cutting components of the structure. The inclusion of superconducting patch is made using the boundary condition, complex resistive. Are obtained when the resonant frequency depending on the parameters of the antenna, radiation pattern of E-Plan and H-Plan for the M-phase arrangements of antennas in the linear and planar configurations for different values of phase and spacing between the elements.

Keywords: Antenna – Microstrip – LTT – Superconductivity – Array – Linear - Planar

# Sumário

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 – TEORIA DOS MATERIAIS SUPERCONDUTORES.....	4
2.1 INTRODUÇÃO.....	4
2.2 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS SUPERCONDUTORES.....	4
2.3 TEORIA BCS DA SUPERCONDUTIVIDADE.....	6
2.4 EQUAÇÕES DE LONDON.....	7
2.5 MODELOS DOS DOIS FLUIDOS.....	8
2.6 IMPEDÂNCIA DE SUPERFÍCIE.....	9
CAPÍTULO 3 – ARRANJOS DE ANTENAS.....	12
3.1 INTRODUÇÃO.....	12
3.2 ARRANJO LINEAR.....	12
3.2.1 FASE E ESPAÇAMENTO ENTRE OS ELEMENTOS EM UM ARRANJO LINEAR.....	14
3.3 ARRANJO PLANAR.....	18
3.3.1 FASE E ESPAÇAMENTO ENTRE OS ELEMENTOS EM UM ARRANJO PLANAR.....	19
CAPÍTULO 4 – ANTENA RETANGULAR DE MICROFITA COM PATCH SUPERCONDUTOR.....	22
4.1 INTRODUÇÃO.....	22
4.2 DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO LTT.....	23
4.3 DETERMINAÇÃO DOS CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS DA ANTENA DE MICROFITA COM SUPERCONDUTOR.....	27
4.4 DETERMINAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA.....	31
4.5 CÁLCULO DO DIAGRAMA DE RADIAÇÃO NO PLANO-E E PLANO-H.....	33
CAPÍTULO 5 - RESULTADOS.....	35
5.1 INTRODUÇÃO.....	35
5.2 ANTENA DE MICROFITA COM SUPERCONDUTOR.....	35
5.3 ARRANJO LINEAR.....	37
5.4 ARRANJO PLANAR.....	39
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES.....	43
6.1 INTRODUÇÃO.....	44
6.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46



---

# Lista de Figuras

---

Figura 1.1 – Antena de microfita com <i>patch</i> retangular.....	1
Figura 1.2 – Arranjo linear de uma antena de microfita supercondutora com quatro elementos.....	2
Figura 1.3 – Arranjo planar de uma antena de microfita supercondutora de 4x4 elementos.....	2
Figura 2.1 – Resistividade do mercúrio em função da temperatura em <i>Kelvin</i> .....	4
Figura 2.2 – Efeito <i>Meissner</i> na transição da temperatura crítica. (a) Temperatura do supercondutor acima da temperatura crítica; (b) Supercondutor resfriado abaixo de sua temperatura crítica .....	6
Figura 2.3 – Impedância de superfície de um dielétrico, de um metal normal e de um supercondutor .....	9
Figura 3.1 – Geometria de um arranjo linear de N elementos.....	13
Figura 3.2 – Arranjo de fase em uma antena.....	15
Figura 3.3 – Diagrama do fator de arranjo com 5 elementos ( $N=5$ , $d=\lambda/2$ e $\beta=0$ ).....	16
Figura 3.4 – Diagrama do fator de arranjo com $\theta_o = 60^\circ$ ( $N=3$ , $d=\lambda/2$ ) .....	17
Figura 3.5 – Geometria de um arranjo planar de NxM elementos....	18
Figura 4.1 – Ressonador Retangular de Microfita.....	22
Figura 4.2 – Seção transversal de um ressonador retangular de microfita com patch de largura $w$ .....	23
Figura 4.3 – Vista superior de um ressonador retangular de microfita com <i>patch</i> de largura $w$ e comprimento $l$ .....	23
Figura 4.4 – Vista da seção transversal da antena de microfita com <i>patch</i> supercondutora. ....	27
Figura 5.1 – Antena de microfita com Supercondutor. ....	35
Figura 5.2 – Gráfico comparativo da Freqüência em função do comprimento da fita condutora considerando as temperaturas críticas de 90K e 160K.....	36
Figura 5.3 – Gráfico comparativo da Freqüência em função do comprimento da fita condutora considerando várias temperaturas críticas .....	37
Figura 5.4 – Arranjo linear de uma antena de microfita supercondutora com quatro elementos.....	38
Figura 5.5 – Diagramas de radiação do arranjo linear com $\theta = 80^\circ$ (a) Plano-E (b) Plano-H .....	38
Figura 5.6 – Diagramas de radiação do arranjo linear com $\theta = 130^\circ$ (a) Plano-E (a) Plano-H.....	39
Figura 5.7 – Diagrama de radiação do arranjo planar com $d_x = d_y = \lambda/2$ . (a) Plano-E (b) Plano-H.....	40
Figura 5.8 – Diagrama de radiação do arranjo planar com $d_x = d_y = 3/2 \lambda$ . (a) Plano-E (b) Plano-H.....	41
Figura 5.9 – Diagrama de radiação do arranjo planar com $d_x=d_y=\lambda/2$ e $\theta = 90^\circ$ e $\phi = 75^\circ$ (a) Plano-E (b) Plano-H.....	42
Figura 5.10 – Diagrama de radiação do arranjo planar com $d_x=d_y=\lambda/2$ e $\theta = 90^\circ$ , $\phi = 110^\circ$ (a) Plano-E (b) Plano-H .....	42
Figura 5.11 – Diagrama de radiação do arranjo planar com $d_x=d_y= 3/2 \lambda$ e $\theta = 90^\circ$ e $\phi = 80^\circ$ (a) Plano-E (b) Plano-H .....	43

# Lista de Símbolos e Abreviaturas

- $h_i$  Altura da  $i$ -ésima camada da microfita
- $\phi$  Ângulo de azimute
- $\theta$  Ângulo de elevação
- $\bar{H}$  Campo magnético crítico
- $e$  Carga do elétron
- $\Delta_t$  Componente tangencial do operador nabla
- $l$  Comprimento da fita
- $\lambda$  Comprimento de onda,  $\lambda=c.f$
- $\sigma$  Condutividade
- $\sigma_n$  Condutividade Normal
- $\sigma_s$  Condutividade do Supercondutor
- $\gamma$  Constante de propagação complexa na direção  $y$
- $I$  Corrente elétrica
- $d_y, d_x$  Distância dos elementos de um arranjo na direção  $Y$  e  $X$
- $t_i$  Espessura da  $i$ -ésima camada da microfita
- $\beta$  Fase progressiva; constante de fase
- FA Fator de Arranjo
- $\omega$  Frequência angular
- F Frequência; função de base
- $Z_s$  Impedância de superfície
- W Largura da fita
- M Massa da partícula
- Y Matriz admitância
- K Matriz característica
- Z Matriz Impedância
- $k_i$  número de onda da  $i$ -ésima região,
- $j$  Número imaginário unitário,  $j = (-1)^{1/2}$
- N, M Número de elementos do arranjo nas direções,  $Y$  e  $X$
- $j$  Número imaginário unitário,  $j = (-1)^{1/2}$

$\mu_i$  Permeabilidade magnética na i-ésima região,  $\mu_i = \mu_0 \mu_{ri}$   
 $\mu_0$  Permeabilidade no espaço livre  
 $\mu_{ri}$  Permeabilidade Permeabilidade relativa na i-ésima região  
 $\epsilon_i$  Permissividade na i-ésima região,  $\epsilon_i = \epsilon_0 \epsilon_{ri}$   
 $\epsilon_0$  Permissividade no espaço livre  
 $\epsilon_{ri}$  Permissividade relativa na i-ésima região  
 $\lambda_{ef}$  Profundidade de penetração efetiva  
 $\lambda_l$  Profundidade de penetração de London  
 $\delta$  Profundidade pelicular  
 $n$  Quantidade de partículas  
 $T$  Temperatura  
 $T_c$  Temperatura crítica  
 $\vec{J}$  Vetor densidade de corrente  
 $\vec{J}_t$  Vetor densidade tangencial de corrente  
 $x$  Vetor unitário na direção x  
 $y$  Vetor unitário na direção y  
 $z$  Vetor unitário na direção z  
 $\vec{E}$  Vetor campo elétrico  
 $\vec{E}_T$  Vetor campo elétrico tangencial  
 $\vec{H}$  Vetor campo magnético  
 $\vec{H}_T$  Vetor campo magnético tangencial  
 $\vec{B}$  Vetor densidade campo magnético

# Lista de Tabelas

Tabela.1 – Comparação da condutividade e profundidade de penetração de London para diversos materiais e metais .....	11
--	----

---

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

---

No presente trabalho serão tratados os conceitos de teoria eletromagnética aplicados juntamente com arranjos de fase em antenas planares de microfita com *patch* supercondutor. A teoria microscópica BCS e as teorias macroscópicas: Modelo dos Dois Fluidos e as Equações de *London* serão utilizadas em conjunto com o método de onda completa, o LTT (Linha de Transmissão Transversa) na determinação dos campos eletromagnéticos da antena com supercondutor.

Será analisada uma antena *patch* de microfita (que pode ser alimentada de várias formas, dentre elas por uma linha de microfita) e sendo constituída de um elemento radiante de material supercondutor com a temperatura crítica 212K na temperatura ambiente de  $T=200K$  sobreposto a um plano de terra separado por um único substrato dielétrico, como mostra a Figura 1.1 e por meio desse dielétrico teremos todas as linhas de campo.

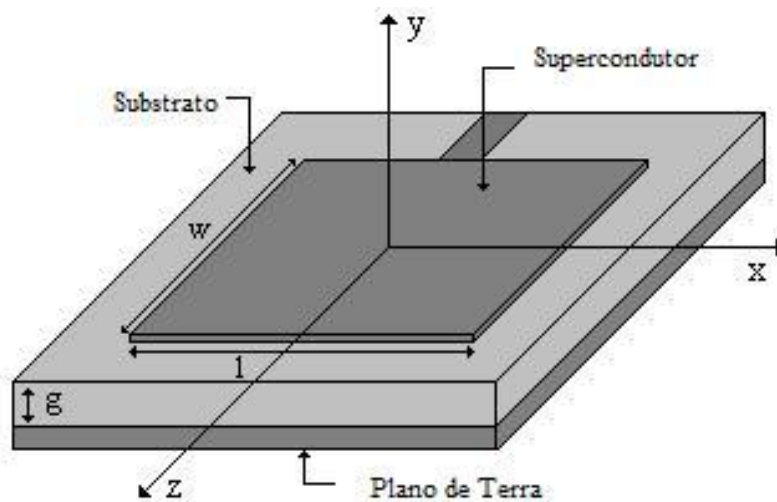
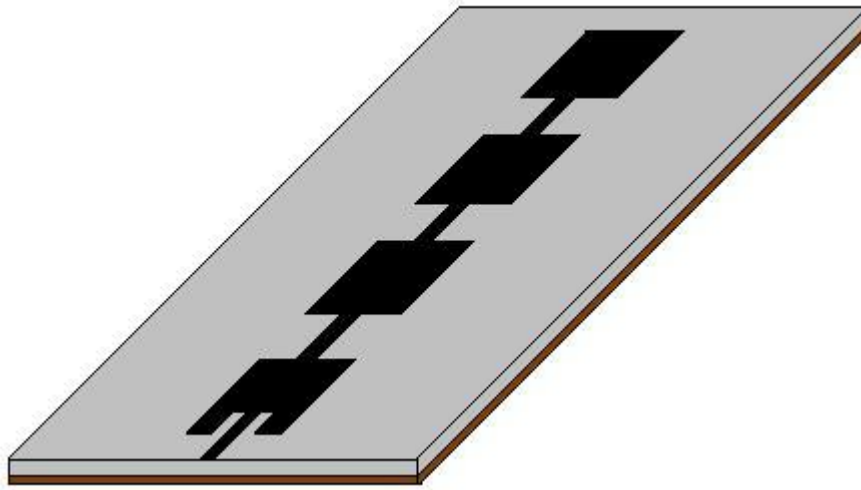


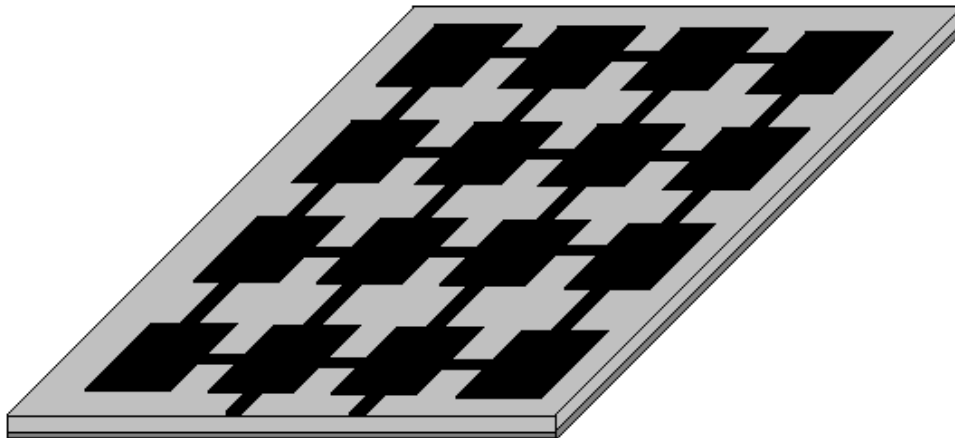
Figura 1.1 - Antena de microfita com *patch* retangular.

O padrão de radiação de um único elemento é relativamente amplo e cada elemento fornece baixos índices de diretividade. Para solucionar estes problemas é comum o uso de arranjos de antenas, onde os elementos estão distribuídos de uma maneira uniforme seja ao longo de um eixo (linear) ou de uma superfície plana (planar). Na Figura 1.2 está ilustrado um arranjo linear com quatro elementos idênticos e com

espaçamento constante entre os seus elementos adjacentes. Na Figura 1.3 é mostrado um arranjo planar de uma antena de microfita.



**Figura 1.2 - Arranjo linear de uma antena de microfita supercondutora com quatro elementos.**



**Figura 1.3 - Arranjo planar de uma antena de microfita supercondutora de 4x4 elementos.**

No Capítulo 2 será apresentado um breve resumo teórico sobre o fenômeno supercondutivo [1]-[5]. Serão apresentados os mais importantes métodos de análise dos supercondutores [6]-[10], os principais efeitos à temperatura abaixo da temperatura crítica desses materiais e os efeitos em relação às frequências elevadas.

No Capítulo 3 será abordada a teoria sobre arranjo de fase em antenas, em configurações lineares e planares de seus elementos [11]-[13]. Será mostrado como determinar o fator de arranjo, que é de fundamental importância na determinação dos diagramas de radiação das estruturas analisadas.

No Capítulo 4 serão determinados os campos eletromagnéticos da antena *patch* de microfita com material supercondutor, aplicando para isso o método da Linha de Transmissão Transversa [14],[16]-[19], que servirá para determinação da frequência complexa de ressonância e obtenção dos diagramas de radiação do plano-E e plano-H [23]-[24]. Combinando com os resultados obtidos no Capítulo 3, será possível a obtenção dos diagramas de radiação das antenas.

O Capítulo 5 mostra os resultados obtidos para a antena *patch* de microfita retangular e para os arranjos lineares e planares com material supercondutor, onde se utilizou programas elaborados nas linguagens *Fortran PowerStation* e *Matlab7.0*.

No Capítulo 6 o desenvolvimento teórico e os resultados obtidos neste trabalho serão comentados e serão apresentadas algumas propostas de futuros trabalhos.

---

# Capítulo 5

## RESULTADOS

---

### 5.1 INTRODUÇÃO

No presente capítulo, são apresentados os resultados computacionais obtidos para a antena de microfita com patch supercondutor e para arranjos de antenas em configurações lineares e planares de seus elementos supercondutores.

Foram elaborados programas computacionais nas linguagens *Fortran* *Powerstation* para elaboração da frequência de ressonância e *Matlab* 7.0 para levantamento das curvas e diagrama de radiação para obtenção dos resultados.

### 5.2 RESULTADOS DA ANTENA DE MICROFITA COM SUPERCONDUTOR

Na obtenção dos resultados da antena de microfita com *patch* supercondutor é considerada a estrutura apresentada logo abaixo na Figura 5.1, onde, o *patch* tem largura  $l$ , comprimento  $w$  e espessura  $t$ . O substrato apresenta uma permissividade relativa  $\epsilon_r$  e espessura  $g$ .

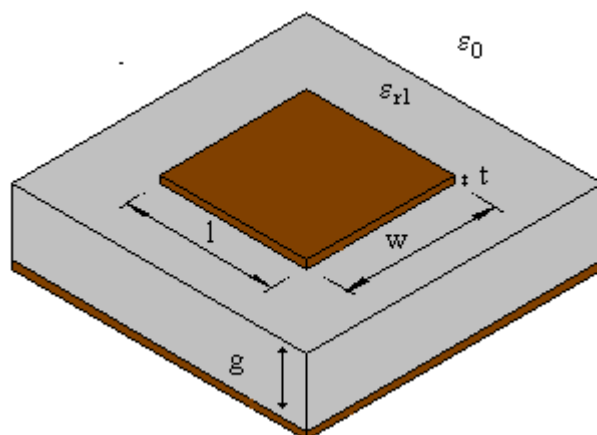
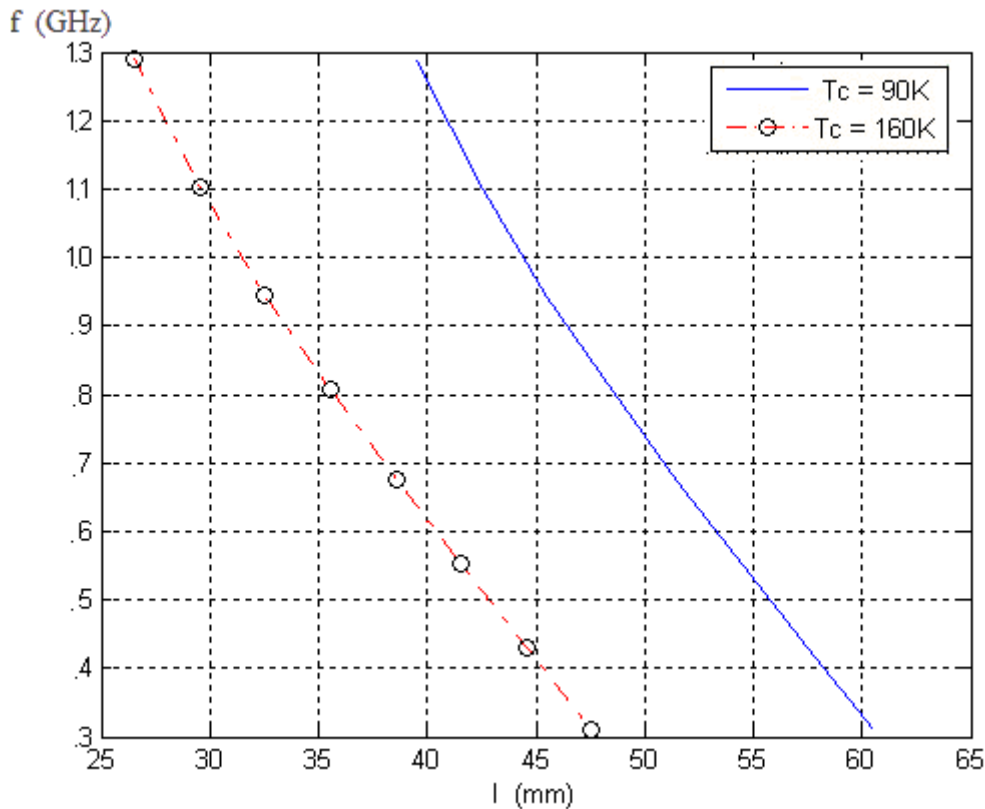


Figura 5.1 - Antena de microfita com Supercondutor.

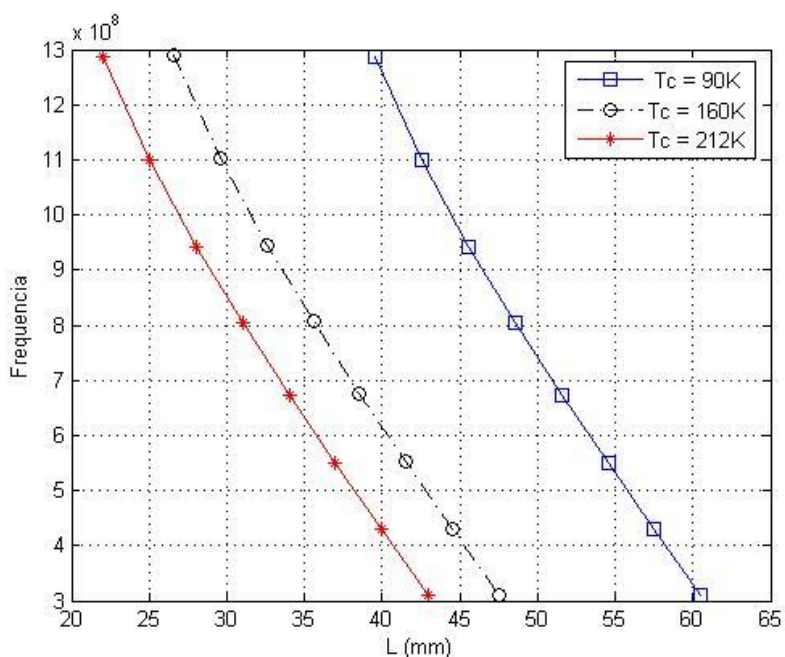


A Figura 5.2 mostra um gráfico comparativo entre a frequência de ressonância em função do comprimento da fita condutora considerando duas temperaturas críticas, sendo as dimensões da antena com o *patch* supercondutor com uma temperatura crítica de 90K a 160K:  $g = 0,7\text{mm}$ ,  $w = 25\text{ mm}$ ,  $\epsilon_{r1} = 10.2$  (RT/Duroid 6010LM),  $\epsilon_{r2} = 1$ ; sendo a fórmula do supercondutor YBCO e SnBaCaCuO<sub>y</sub> com parâmetros:  $\sigma_n = 1.88.10^5\text{ s/m}$ ,  $\lambda_{ef} = 360,74\text{ nm}$ ,  $t = 10\text{ mm}$ .



**Figura 5.2 - Gráfico comparativo da Frequência em função do comprimento da fita condutora considerando as temperaturas críticas de 90K e 160K.**

A Figura 5.3 mostra um gráfico comparativo entre a frequência de ressonância em função do comprimento  $l$  do *patch* condutor considerando, várias temperaturas críticas, 90K, 160, e 212 K sendo as dimensões da antena com supercondutor :  $g = 0,7\text{ mm}$ ,  $w = 25\text{ mm}$ ,  $\epsilon_{r1} = 10.2$  (RT/Duroid 6010LM),  $\epsilon_{r2} = 1$ . Para a temperatura crítica  $T_c = 212\text{K}$  ( $-61^\circ\text{C}$ ) a fórmula do supercondutor é Sn<sub>5</sub>InBa<sub>4</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>10</sub>O<sub>y</sub> onde são usados os parâmetros:  $\sigma_n = 1,88.10^5\text{ S/m}$ ,  $\lambda_{ef} = 360,74\text{ nm}$ , espessura do patch,  $t = 10\text{ mm}$ ).



**Figura 5.3 - Gráfico comparativo do comprimento da fita condutora em função da frequência de ressonância considerando as temperaturas críticas de 90K (YBCO), 160K (SNBaCaCuO<sub>y</sub>) e 212K (Sn<sub>5</sub>In)Ba<sub>4</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>10</sub>O<sub>y</sub>**

Como mostrado acima, as curvas se comportam de forma diferente à medida que a temperatura crítica varia, ou seja, quando aumentamos as temperaturas críticas de 90K à 212K observa-se que o comprimento do *patch* diminui [31]- [32].

### 5.3 ARRANJO LINEAR

Para os arranjos lineares das antenas de microfita obtiveram-se os diagramas de radiação no plano-E e plano-H, onde se utilizou o método da Linha de Transmissão Transversa para determinar os parâmetros do *patch* na obtenção dos diagramas de radiação das antenas supercondutoras. Será considerado um arranjo linear conforme ilustrado na Figura 5.4, sendo o espaçamento entre os elementos iguais.

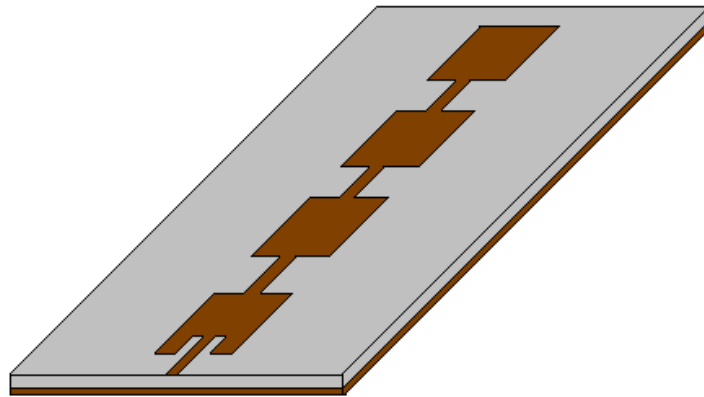


Figura 5.4 - Arranjo linear de uma antena de microfita supercondutora com quatro elementos.

A Figura 5.5 mostra os diagramas de radiação para um arranjo linear com 4 elementos espaçados em  $\lambda/2$ , para um ângulo de radiação de  $80^\circ$  resultando em uma fase  $\beta = 31,25^\circ$ .

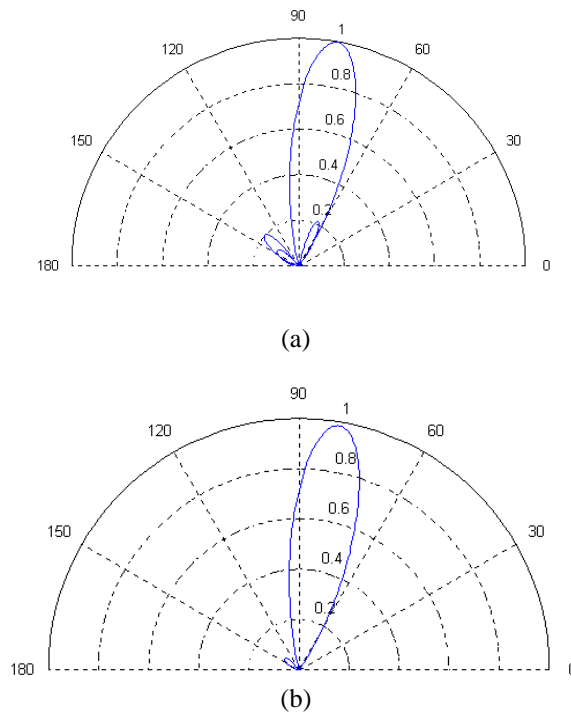


Figura 5.5 - Diagramas de radiação do arranjo linear com  $\theta = 80^\circ$  (a) Plano-E (b) Plano-H.

Na Figura 5.6 temos um ângulo de radiação de  $130^\circ$  e uma fase  $\beta = 115,70^\circ$ . Observa-se que o aumento no ângulo de radiação diminui a intensidade dos diagramas como pode ser visto na Figura 5.6, em que a intensidade do campo é inferior a 0,8. Essa diminuição deve-se ao fato de que o arranjo é constituído de elementos *patches*, sendo

uma característica desse tipo de antena uma diminuição do padrão de radiação quando se aproxima de sua direção *end-fire*.

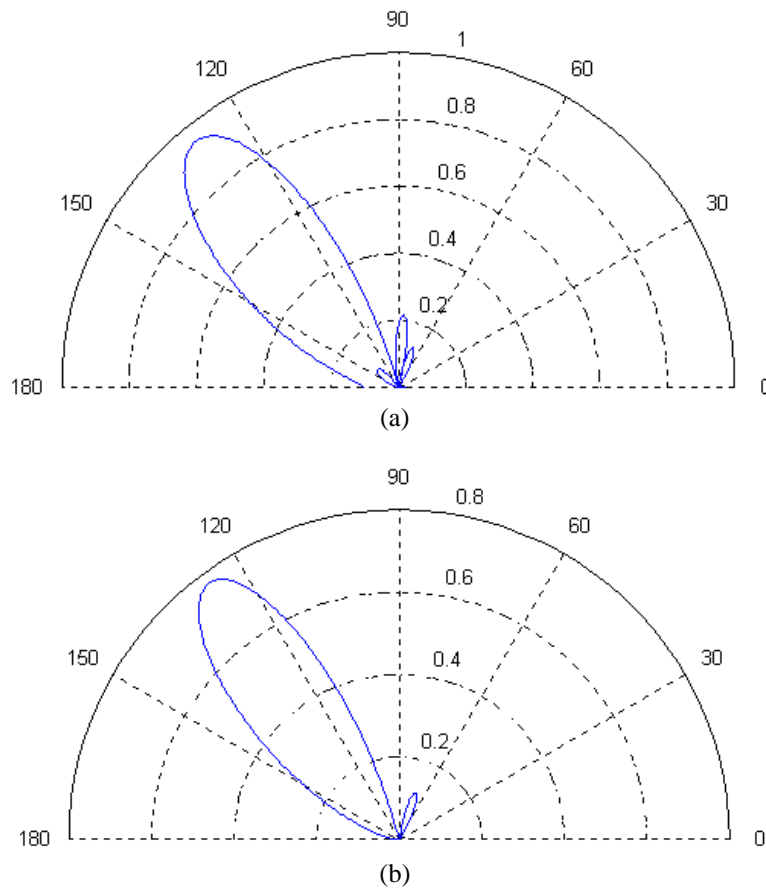
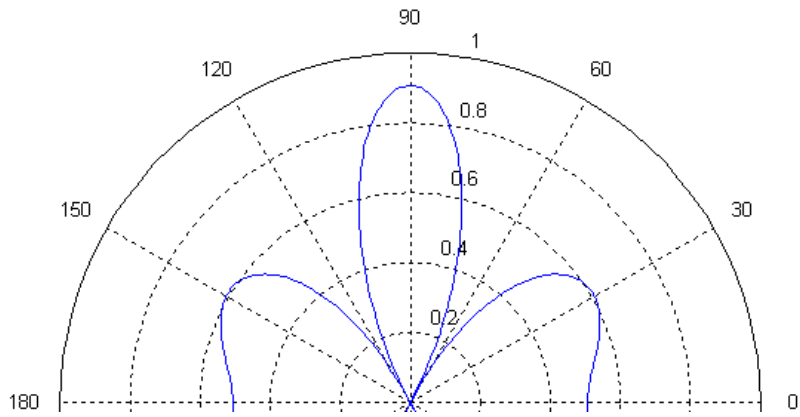


Figura 5.6 - Diagramas de radiação do arranjo linear com  $\theta = 130^\circ$  (a) Plano-E (b) Plano-H.

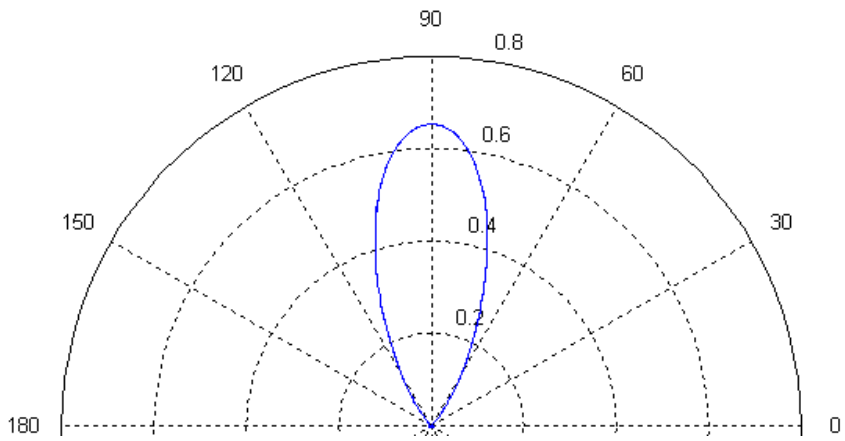
## 5.4 ARRANJO PLANAR

Os diagramas para o plano-E e plano-H de um arranjo planar de 16 elementos (4x4) elementos, estando espaçados a uma distância  $d_x$  e  $d_y$ , foram ilustrados na Figura 1.3.

A Figura 5.7 mostra os diagramas de radiação de um arranjo planar formado por 16 (4x4) elementos e espaçados em  $\lambda/2$ , com  $\theta=45^\circ$  e  $\phi = 90^\circ$ . Na Figura 5.8 o arranjo é formado por 16 (4x4) elementos, porém espaçados em  $3/2 \lambda$ , com  $\theta=45^\circ$  e  $\phi = 90^\circ$ . Observa-se que o aumento do espaçamento entre os elementos aumenta a diretividade do arranjo. Porém, observa-se um aumento na quantidade de lóbulos secundários como visto na Figura 5.9 (a).

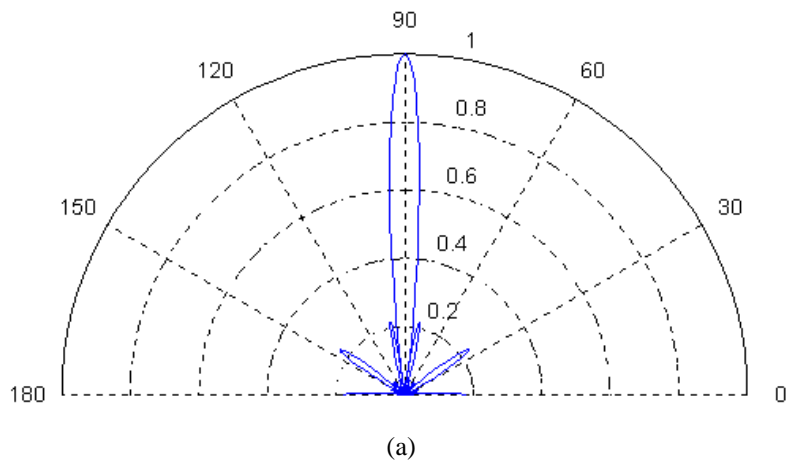


(a)

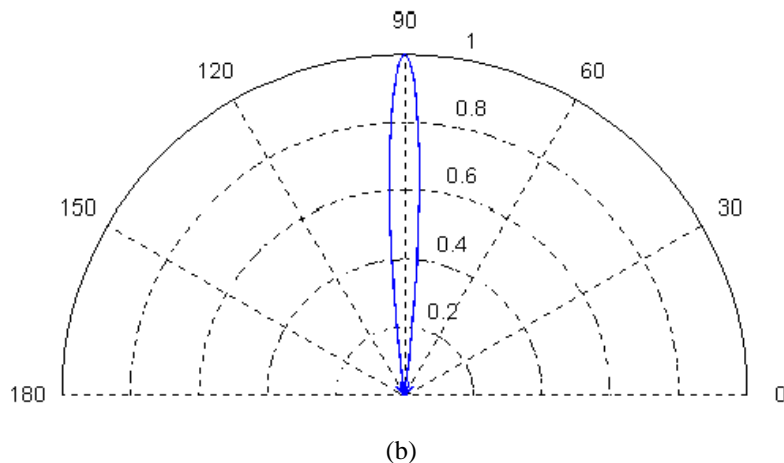


(b)

**Figura 5.7 - Diagrama de radiação do arranjo planar com  $d_x = d_y = \lambda/2$ . (a) Plano-E (b) Plano-H.**

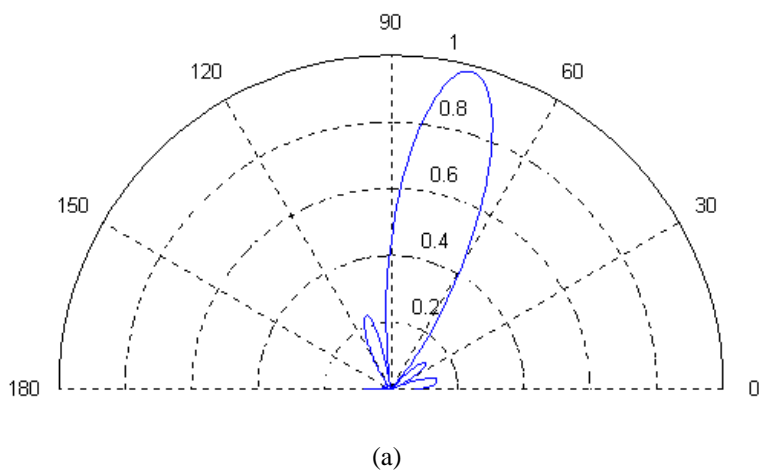


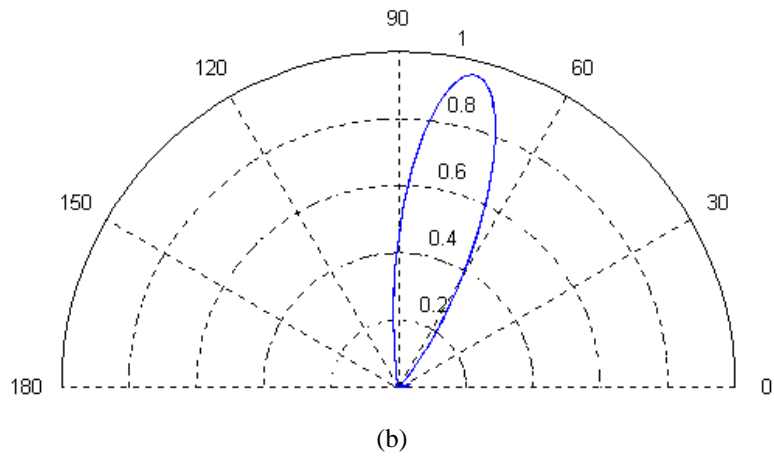
(a)



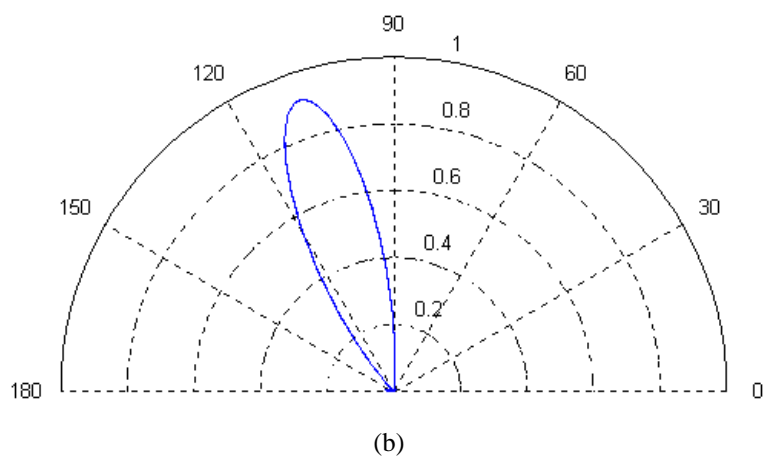
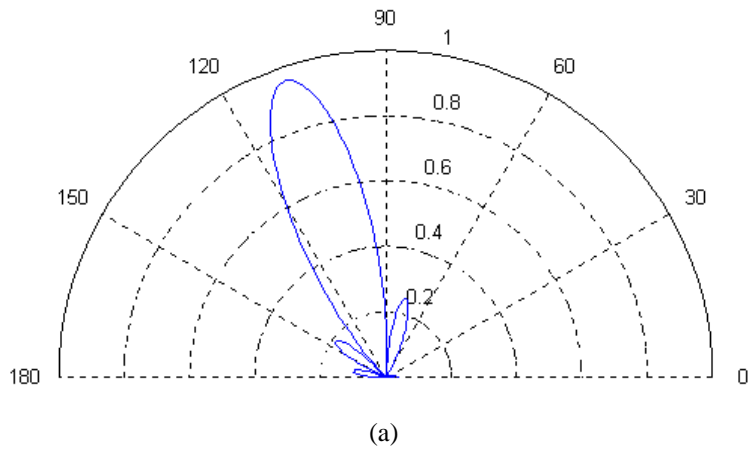
**Figura 5.8 - Diagrama de radiação do arranjo planar com  $d_x = d_y = 3/2 \lambda$ . (a) Plano-E (b) Plano-H.**

Os diagramas de radiação do plano-E com 16 (4x4) elementos espaçados em  $\lambda/2$ , com  $\theta = 90^\circ$  e  $\phi = 75^\circ$ , resultando em  $\beta_x = -46,59^\circ$  e  $\beta_y = -173,86^\circ$ ; e  $\theta = 90^\circ$ ,  $\phi = 110^\circ$ ,  $\beta_x = 61,56^\circ$  e  $\beta_y = -169,14^\circ$ , estão ilustrados na Figura 5.9 e Figura 5.10, respectivamente. Na Figura 5.11, temos o mesmo arranjo, porem os elementos espaçados em  $3/2 \lambda$  com  $\theta = 90^\circ$  e  $\phi = 80^\circ$ . Na Figura 5.10, temos uma mudança de fase de  $15^\circ$  em relação à direção *broadside*. Nela, pode-se observar o surgimento de lóbulos secundários de pouca intensidade, mesmo quando temos uma inclinação de  $20^\circ$ . Figura. 5.11. Na Figura 5.12, observa-se o aparecimento de lóbulos secundários de níveis bastante elevados. Isso ocorre porque o critério entre a distância entre os elementos e a direção de maior irradiação não foi obedecida. Os lóbulos secundários são desejáveis, pois, são muito utilizados em arranjos de antenas inteligentes, de forma que devem ser analisados cuidadosamente em um projeto de arranjo de fase de antenas.

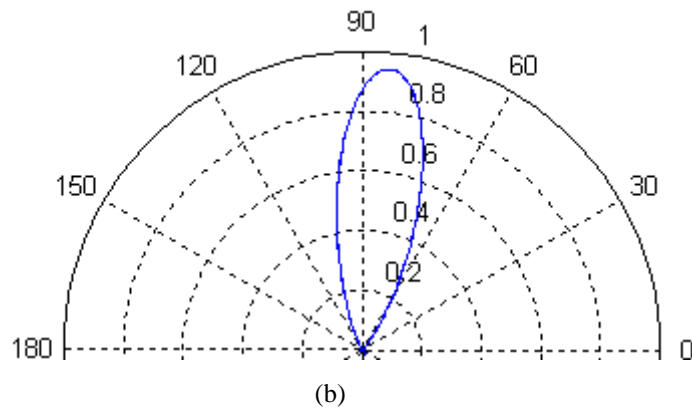
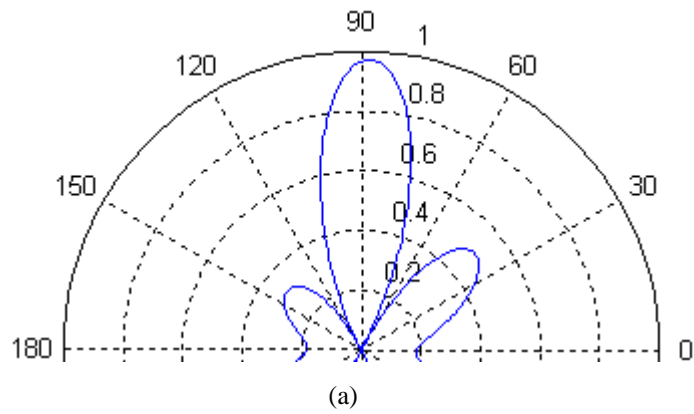




**Figura 5.9- Diagrama de radiação do arranjo planar com  $d_x=d_y=\lambda/2$  e  $\theta = 90^\circ$  e  $\phi = 75^\circ$  (a) Plano-E (b) Plano-H.**



**Figura 5.10 - Diagrama de radiação do arranjo planar com  $d_x=d_y=\lambda/2$  e  $\theta = 90^\circ$ ,  $\phi = 110^\circ$  (a) Plano-E (b) Plano-H.**



**Figura 5.11 - Diagrama de radiação do arranjo planar com  $d_x=d_y=3/2 \lambda$  e  $\theta = 90^\circ$  e  $\phi = 80^\circ$  (a) Plano-E (b) Plano-H.**

Os diagramas de radiação para os arranjos lineares e planares foram todos elaborados tendo os seguintes parâmetros:  $f=1,28$  GHz,  $w = 25$  mm,  $l = 30$  mm  $g = 0,7$ mm,  $\epsilon_{r1} = 10.2$ ,  $\epsilon_{r2} = 1$ ; sendo o Sn5InBa4Ca2Cu10Oyo supercondutor à temperatura de 212K (-61°C).

Outros resultados podem ser encontrados para outros tipos de materiais supercondutores e outros tipos de substratos [25]-[27],[29]-[30].



---

# Capítulo 6

## CONCLUSÕES

---

### 6.1 INTRODUÇÃO

Logo abaixo estão apresentadas as respectivas conclusões referentes aos resultados.

No capítulo 5 foram apresentadas simulações computacionais para a antena de microfita com material supercondutor e para os arranjos lineares e planares de microfita. Obteve-se a frequência de ressonância em função das dimensões da estrutura para a antena com o supercondutor. Observou-se que com o aumento do comprimento do patch a frequência de ressonância diminui. Para os arranjos, obteve-se o diagrama de radiação nos planos E e H e a mudança do padrão em função da mudança da fase entre os elementos que compõe o arranjo. Observou-se que o aumento do espaçamento entre os elementos aumenta a diretividade do arranjo. E que o aumento no ângulo de radiação diminui a intensidade dos diagramas como pode ser visto na Figura 5.6, em que a intensidade do campo é inferior a 0,8. Essa diminuição deve-se ao fato de que o arranjo é constituído de elementos *patches*, sendo uma característica desse tipo de antena uma diminuição do padrão de radiação quando se aproxima de sua direção *end-fire*.

Os lóbulos secundários são muito utilizados em arranjo de antenas adaptativas ou inteligentes dando uma dinâmica ao feixe e possibilitando um uso mais eficiente dos lóbulos principal e secundários.

## 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Utilização de outras geometrias de *patches* tais como trapezoidal, triangular, circular, etc. Trabalhos com arranjo de antenas inteligentes a fim de possibilitar uma dinâmica no feixe de propagação. Analisar os efeitos do substrato em relação a sua permissividade, sua espessura e seus efeitos com a largura de banda e frequência de ressonância. .Pode-se considerar a espessura da lâmina supercondutora durante a análise do ressoador e incluir mais materiais supercondutores com temperatura crítica mais elevada. Outros parâmetros da antena supercondutora também podem ser obtidos, tais como impedância de entrada, diretividade, largura de banda, eficiência, fator de qualidade, etc.

---

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- [1] Charles Kittel, *“Introduction to Solid State Physics”*, John Wiley & Sons, Inc. 1976.
- [2] A. C. Rose-Innes e E. H. Roderik, *“Introduction to Superconductivity”*, 2<sup>a</sup> Edition, Pergamon Press, 1978.
- [3] E. A. Linton, *“Superconductivity”*, London: Mathuen & Co. LTDA, Ney York: John Wiley & Sons Inc. 1964.
- [4] E. B. Eckholm e S. W. Mcknight, *“Attenuation and Dispersion for High-Tc Superconducting Microstrip Lines”*, IEEE-MTT, Vol. 38, pp. 387-395, 1990.
- [5] D. Nghiem, J. T. Williams e D. R. Jackson, *“A General Analysis of Propagation along Multiple-layer Superconducting Stripline and Microstrip Transmission Lines”*, IEEE-MTT, Vol. 39, No 9, pp., 1553-1565, Set.1991.
- [6] J. M. Pond, C. M. Krowne e W. L. Carter, *“On Application of Complex Resistive Boundary Conditions to Model Transmission Lines Consisting of Very Thin Superconductors”*, IEEE-MTT, Vol. 37, No 1, pp. 181-189, Jan. 1989.
- [7] Z. Cai e J. Bornemann, *“Generalized Spectral-Domain Analysis for Multilayered Complex Media and High-Tc Superconductor Application”*, IEEE-MTT, Vol. 40, No 12, pp. 2251-2257, Dez. 1992.
- [8] Zhi-Yuan Shen, *“High-Temperature Superconducting Microwave Circuits”*, Artech House, Inc. 1994.
- [9] O. R. Baiocchi, R. S. Kong e T. Itoh, *“Pulse Propagation in Superconducting Coplanar Striplines”*, IEEE trans., MTT, Vol. 40, No 3, pp. 509-514, Mar. 1992.
- [10] K. K. Mei e G. Liang, *“Eletromagnetics of Superconductors”*, IEEE-MTT, Vol. 39, No 9, pp. 1545-1552, Sep., 1991.
- [11] C. A. Balanis, *“Antenna Theory – Analysis and Design”*. Harper & Row, Publishers, New York, 1982.
- [12] I. J. Bahl e P. Bhartia, *“Microstrip Antennas”*, Artech House, Inc, second printing, 1982.
- [13] Raymond Tang e Richard W. Burns, *“Phased Arrays”*, Antenna Engineering Handbook, Second Edition, McGraw-Hill.

- [14] H. C. C. Fernandes, “*Attenuation And Propagation In Various Finline Structures*”, International Journal of Infrared and Millimeter Waves, vol. 17, N° 08, pp. 1419-1930, Agosto 1996.
- [15] A. Papoulis, “*The Fourier Integral and its applications*”, McGraw-Hill, 1962.
- [16] J. P. da Silva, “*Um Novo Projeto de Antenas Planares Supercondutoras*”, Tese de Mestrado, PpgEE-UFRN, Orientador: Humberto César Chaves Fernandes, Natal, fev.1999.
- [17] I. S. Q. Júnior, “*Análise de Linhas de Microfita Supercondutiva sobre Múltiplas Camadas Com Perdas e Metalização Finita*”, Dissertação de Mestrado, DEE – UFRN, 1993.
- [18] H.C.C. Fernandes, J. P. Silva e G.F.S. Filho, “*TTL Method Applied on Microstrip Rectangular-Patch Antenna Analysis and Design*”, XXVIII Moscow International Conference on Antenna Theory and Technology, Moscow-Russia, Conf. Proc. pp. 424-427 Sept. 1998.
- [19] A. R. N. Farias e H. C. C. Fernandes, “*Microstrip antenna design using the TTL method*”, 1997 SBMO/IEEE International Microwave and Optoelectronics Conference, Natal-RN, pp. 291-296, Ago. 1997.
- [20] J.M.Pond, C.M.Krowne e W.L.Carter, “*On the Application of Complex Resistive Boudary Conditions to Model Transmission Lines Consisting of very Thin Superconductors*”, IEEE MTT, vol. 37, n° 1, pp. 181 - 189, Jan. 1989.
- [21] J.Kessler, R.Dill and P.Russer, “*Field Theory Investigation of High-Tc Superconducting Coplanar Waveguide Transmission Lines and Resonators*”, IEEE MTT, vol. 39, n° 9, pp. 1566 - 1574, Sep. 1991.
- [22] Sidney A. P. Silva e Humberto C.C. Fernandes, “*Funções de base na análise do acoplador de linha de lâmina unilateral acoplada*”, IV SPET-Simpósio de Pesquisa e Extensão em Tecnologia, Natal-RN, Anais pp. 79-81, Nov. 1998.
- [23] E. A. Elbadawy, D. A. Aziz e M. A. Rahman, “*A more comprehensive analysis of a microstrip antenna in the spectral domain*”, Circuits and Systems, 1990., Proceedings of the 33rd Midwest Symposium on , Aug. 1990, vol.1, pp. 125 –128.
- [24] Tatsuo Itoh e Wolfgang Menzel, “*A Full-Wave Analysis Method for Open Microstrip Structures*”, IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol. AP-29, No.1 January 1981, pp. 63-68.

- [25] Humberto C.C. Fernandes e Clenilson B. Fonseca, “*Phased antenna array by dynamic analysis*” Microwave and Optoelectronics Conference, 2001 - IMOC 2001, Proceedings of the 2001 SBMO/IEEE MTT-S International, pp. 291- 294 vol.1.
- [26] Humberto C. Chaves Fernandes e Clenilson Bezerra Fonseca, “*Phased Array Using Rectangular Microstrip Patch*”, 19° Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Fortaleza, Anais 4 pp. CD, 3-6 de Set., 2001.
- [27] Humberto C. C. Fernandes e Clenilson B. Fonseca “*Phased Array Using PBG Structures*”, V Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo – CBMag 2002, Gramado-RS, Nov 2002.
- [28] Paul A. Chiavacci, “*Limited scan antenna systems using phased-array feeds (versus direct radiating array apertures) require fewer array elements; or do they?*”, Phased Array Systems and Technology, 2000. Proceedings. 2000 IEEE International Conference on , 21-25 May, 2000, Pp. 291-297.
- [29] Humberto C. C. Fernandes e Clenilson B. Fonseca, “*Phased Array With Photonic Material*”, International Microwave and Optoelectronics Conference – IMOC 2003, Foz do Iguacu – Paraná.
- [30] Humberto C. C. Fernandes e Clenilson B. Fonseca, “*Microstrip Array with PBG Substrate*”, International Journal of Infrared and Millimeter Waves.
- [31] H.C.C. Fernandes, H. M. C. de A. Maia e L. M. Caetano, “*New Antenna with Superconductor Substrate with Critical Temperature at 212*”, International Conference on Advanced Materials – ICAM, Set. 2009.
- [32] Humberto César Chaves Fernandes, Hugo Michel Câmara A. Maia e Leonardo Martins Caetano, “*New Antenna with Superconductor at Critical Temperature of 212 K*”, International Microwave and Optoelectronics Conference– IMOC, Nov. 2009.
- [33] Humberto César Chaves Fernandes, Eritônio de Figueiredo Silva e Rogério Torres de Carvalho Filho, “*New Analysis of Superconducting Microstrip Antenna Array*”, IMOC2001 -SBMO/IEEE MTT-S International Microwave And Optoelectronics Conference, Belém-PA, pp.93-96, Ago. 2001.
- [34] Humberto C.C. Fernandes e Rogério T. Carvalho Filho, “*Superconducting Microstrip Antenna Array Analyzed by TTL Method*”, World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI 2002) , Orlando, USA, 3p. July 14-18, 2002.

- [35] Humberto César Chaves Fernandes e Luiz Paulo Rodrigues, "*Double Application of Superconductor and Photonic Material on Antenna Array*", WSEAS Trans. on Communications, Atenas, Grécia, pp.425-432, Jul. 2004. ISSN 1109-2742.
- [36] Humberto César Chaves Fernandes e Hugo Michel Câmara de Azevedo Maia, "*Superconductor Substrate With Critical Temperature at 212 For Planar Antenna*", **Journal of Materials Science and Engineering, Vol. 6**, 5pp., ISSN 1934-8959, Jun. 2010. Aceito. ISSN 1934-8959, USA, David Publishing Compan. Paper ( ME9112801).
- [37] Humberto César Chaves Fernandes e Hugo Michel Câmara de Azevedo Maia "*Errors Correction in GPS System Caused by Solar Activity*", **IMOC2009 - SBMO/IEEE MTT-S International Microwave And Optoelectronics Conference**, Conf. Proc. pp.468-470, CD, paper 59008, Belém-PA, Novembro de 2009. **ISBN 978-1-4244-5357-3**.