



Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
Departamento de Engenharia Elétrica



---

## TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TÍTULO: Projeto de uma Antena para um Sistema Radiométrico para Detecção de Descargas Parciais.

ALUNA: Mayanna Aquino do Bú  
MATRICULA: 20611450  
ORIENTADOR: Prof. José Sérgio da Rocha Neto

Campina Grande,  
dezembro de 2011.

Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
Departamento de Engenharia Elétrica

---

## TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia  
Elétrica da Universidade Federal de  
Campina Grande, em cumprimento  
parcial às exigências para obtenção  
do Grau de Engenharia Eletricista.

ALUNA: \_\_\_\_\_

Mayanna Aquino do Bú

ORIENTADOR: \_\_\_\_\_

Prof. José Sérgio da Rocha Neto

Campina Grande,  
dezembro de 2011.

## Agradecimentos

Devo começar os meus agradecimentos voltando-me para os que fizeram a realização deste trabalho possível:

Agradeço ao doutorando José Maurício pela ideia inicial de realização deste trabalho e pelo apoio e confiança concebidos.

Ao professor José Sérgio pela orientação e oportunidade de utilizar as instalações do LIEC para a realização deste projeto.

Ao professor Rômulo por toda sua paciência em sanar minhas dúvidas sobre a teoria de antenas e pelas ideias e conselhos na busca de melhores resultados. A Galba e a Simões pela ajuda e pelas ideias.

E a todos da sala de Instrumentação pelo companheirismo e apoio: Leticia, Luiz, Tony, Agripino, Anderson.

Agradeço também, aos que foram decisivos à minha chegada até aqui, último requisito para a obtenção do grau de Engenheira Eletricista:

À D. Maria Antônia, por ter suportado meus dias mais estressantes e pelos cafés da manhã depois de minhas noites não dormidas estudando.

Ao Sr. Aluisio, pelas mais de 112h desperdiçadas dentro de um carro para me levar à UFCG durante estes cinco anos.

A Myria, Sylvia e Maysa pela certeza, mesmo à distância, que sempre terei o apoio e o amor de vocês.

A todos os meus amigos e colegas de curso, especialmente o pessoal do 2006.1, que compartilharam comigo no dia-a-dia os nervosismos, dificuldades e alegrias dentro e fora da graduação. Muito sucesso a todos!

E finalmente, aos professores e funcionários do curso de Engenharia Elétrica da UFCG pela ajuda, direta ou indireta, e pela ótima formação.

## Sumário

Agradecimentos.....	1
Lista de Figuras .....	4
Introdução.....	5
Objetivos .....	6
Capítulo I – Informações Gerais sobre a Antena Idealizada .....	7
1.1. Introdução.....	7
1.2. Antena Omnidirecional .....	7
1.3. Antena de Banda Ultra Larga .....	8
1.3.1. Antenas Independentes da Frequência .....	8
1.4. Conclusão .....	9
Capítulo II – Simulação.....	10
2.1. Introdução.....	10
2.2. Etapas da simulação .....	10
2.3. Antena Impressa .....	10
2.4. Implementação .....	11
2.5. Parâmetros de análise .....	11
2.5.1. Diretividade e Diagrama de Irradiação .....	11
2.5.2. Parâmetros S.....	12
2.6. Conclusão .....	13
Capítulo III – Apresentação das Antenas Simuladas.....	15
3.1. Introdução.....	15
3.2. Antena Bow-Tie .....	15
3.2.1. Teoria.....	15
3.2.2. Parâmetros Variáveis e Constantes na Simulação .....	16
3.3. Antena Log-Periódica Planar .....	16
3.3.1. Teoria.....	16
3.3.2. Parâmetros Variáveis e Constantes na Simulação .....	18
3.4. Antena Espiral de Arquimedes .....	18
3.4.1. Teoria.....	18
3.4.2. Parâmetros Variáveis e Constantes na Simulação .....	20
3.5. Antena Discone Planar .....	20

3.5.1. Teoria.....	20
3.5.2. Parâmetros Variáveis e Constantes na Simulação .....	21
3.6. Conclusão .....	21
Capítulo IV – Resultados das Simulações das Antenas .....	22
4.1. Introdução.....	22
4.2. Antena Bow-Tie .....	22
4.3. Antena Log-Periódica Planar .....	24
4.4. Antena Espiral de Arquimedes .....	26
4.5. Antena Discone Planar .....	28
4.6. Comparativo entre as Antenas Simuladas .....	30
4.7. Conclusão: Antena Proposta.....	33
4.7.1. Detalhes da Antena Proposta Simulada.....	34
4.7.2. Impedância de Entrada da Antena .....	34
Capítulo V – Confeção .....	36
5.1. Introdução.....	36
5.2. Técnica de Fabricação e Materiais Utilizados.....	36
5.3. Alimentação e Casamento de Impedância.....	36
5.4. Conclusão .....	37
Capítulo VI – Medições e Análises .....	38
6.1. Introdução.....	38
6.2. Resultados das Medições .....	38
6.3. Análise dos Resultados.....	39
Considerações Finais .....	40
Proposta de Continuação do Trabalho.....	41
Referências Bibliográficas .....	42

## Lista de Figuras

Figura 1: Diagrama de Irradiação Omnidirecional [4].	7
Figura 2: Sistema de duas portas.	12
Figura 3: Modelo da Antena Bow-Tie Simulada.	15
Figura 4: Estrutura de configuração Experimental da Antena Log-Periódica Planar [11].	17
Figura 5: Modelo da Antena Log-Periódica Planar Simulada.	18
Figura 6: Modelo da Antena Espiral de Arquimedes Simulada.	19
Figura 7: Modelo da Antena Discone Planar Simulada.	20
Figura 8: Diagrama de Irradiação (Diretividade) da Antena Bow-Tie na banda de frequências de 100MHz a 1GHz.	23
Figura 9: Zoom do Diagrama de Irradiação da Figura 8.	23
Figura 10: Parâmetro $S_{1,1}$ da Antena Bow-Tie.	24
Figura 11: Diagrama de Irradiação (Diretividade) da Antena Log-Periódica Planar na banda de frequências de 100MHz a 1GHz.	25
Figura 12: Zoom do Diagrama de Irradiação da Figura 11.	25
Figura 13: Parâmetro $S_{1,1}$ da Antena Log-Periódica.	26
Figura 14: Diagrama de Irradiação (Diretividade) da Antena Espiral na banda de frequências de 100MHz a 1GHz.	27
Figura 15: Zoom do Diagrama de Irradiação da Figura 14.	27
Figura 16: Parâmetro $S_{1,1}$ da Antena Espiral.	28
Figura 17: Diagrama de Irradiação (Diretividade) da Antena Discone Planar na banda de frequências de 100MHz a 1GHz.	29
Figura 18: Zoom do Diagrama de Irradiação da Figura 17.	29
Figura 19: Parâmetro $S_{1,1}$ da Antena Discone Planar.	30
Figura 20: Parâmetros $S_{1,1}$ das quatro antenas apresentadas visualizados em uma mesma escala.	31
Figura 21: Comparativo relativo à Largura de Banda das quatro antenas apresentadas.	32
Figura 22: Comparativo entre os Diagramas de Irradiação (Diretividade), na frequência de 550MHz, das quatro antenas apresentadas.	33
Figura 23: Disposição Geométrica, no plano x-y, da Antena Discone Planar Proposta.	34
Figura 24: Impedância de Entrada da Antena Discone Planar.	35
Figura 25: Parâmetros $S_{1,1}$ da Antena Discone Planar em função da variação da impedância da porta de alimentação.	35
Figura 26: Protótipo Físico da Antena Discone Planar Simulada.	37
Figura 27: Resultado da Medição do Parâmetro $S_{1,1}$ da Antena Discone Planar confeccionada.	38
Figura 28: Possível modelo da omnidirecionalidade da antena bidirecional. Perdas menores que 1,6dB.	41

## Introdução

Conhecidas por serem característica de defeitos de isolamento em equipamentos de alta voltagem, as descargas parciais (*partial discharge*) se manifestam através de minúsculos arcos elétricos no interior do material dielétrico, causando sua degradação e envelhecimento até culminar com a falha completa e possível destruição do equipamento [1].

A atividade de descargas parciais, no caso específico em transformadores, merece destaque por se desenvolver silenciosamente e deve ser monitorada, preventivamente, de forma a acompanhar a evolução deste problema para se planejar uma intervenção antes de ocorrer alguma falha.

Teoricamente, quando cargas elétricas movem-se com velocidade não constante, emissão de energia por meio de radio frequência (irradiação eletromagnética) ocorre e um sinal espalha-se a partir do ponto da descarga em todas as direções [2]. No caso das descargas parciais, estas têm efeitos produzidos por descargas corona na banda de frequência de 10 a 100 MHz e efeitos produzidos por descargas parciais na banda de frequência de 100 a 1000 MHz.

Deste modo, uma rotina de detecção e de medição contínua da interferência de rádio frequência, para o diagnóstico de defeitos em equipamentos de transmissão e distribuição, pode ser feita usando um receptor de radio direcional para determinar a intensidade e a posição geral das descargas.

O uso de sistemas radiométricos para detecção de descargas parciais tem se tornado uma grande promessa, já que podem ser facilmente implantados por possuírem sensoriamento remoto, por não exigirem qualquer contato físico e por poder ser aplicados a qualquer item da planta energizado.

A antena é uma parte fundamental no processo de monitoramento de descargas parciais usando um sistema radiométrico. É a antena que desempenha o papel de sensor nesse tipo de detecção onde a chave é o sensor, que precisa não apenas de um bom desempenho na detecção, mas também uma instalação conveniente [3].

Neste contexto, a concepção de uma antena para um sistema radiométrico para detecção de descargas parciais é o objetivo da realização deste trabalho de conclusão de curso.

## Objetivos

Este trabalho teve como objetivo geral o desenvolvimento do projeto completo de uma antena (escolha, simulação, construção, medições e análises) para um sistema radiométrico para detecção de descargas parciais.

O trabalho foi focado apenas nas descargas parciais que emitem ondas na banda de frequência de 100 a 1000 MHz. Deste modo, idealmente, a antena a ser desenvolvida deveria ter banda ultra larga, que compreendesse a banda de frequência das ondas emitidas pelas descargas parciais, e deveria ser omnidirecional, ou seja, irradiar ou captar energia uniformemente em todas as direções em um plano.

O planejamento geral do progresso da realização do projeto foi dividido cronologicamente nas seguintes partes e objetivos:

- Estudo da teoria sobre antenas: definir o melhor tipo e formato da antena desejada;
- Simulação das Antenas: conhecer as respostas das possíveis antenas a serem propostas e aperfeiçoar o desempenho da antena, uma vez encontrada as características necessárias. (Uso do *software* de simulações eletromagnéticas *Microwave-Studio CST®*);
- Confecção: conceber um protótipo físico do modelo simulado e proposto. (Auxílio dos materiais necessários à construção do projeto no Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle – LIEC do Departamento de Engenharia Elétrica – DEE no Centro de Engenharia Elétrica e Informática – CEEI da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG);
- Medições: obter as respostas de desempenho da antena proposta. (Uso de instrumentos de medição do próprio laboratório);
- Análise e conclusão do projeto: verificar e analisar as respostas obtidas nas medições;
- Relatório Final: escrever um relatório contemplando todo o desenvolvimento realizado.

De modo específico, objetivou-se contribuir com a Tese em andamento do MSc. Eng. José Maurício R. de S. Neto.



# Capítulo I – Informações Gerais sobre a Antena Idealizada

## 1.1. Introdução

Conforme as especificações do projeto do sistema radiométrico para detecção de descargas parciais, sabe-se que, a antena idealizada a ser desenvolvida durante a execução deste trabalho deve ser omnidirecional e ter largura de banda larga.

A teoria básica sobre estas características da antena será apresentada neste capítulo.

## 1.2. Antena Omnidirecional

A antena omnidirecional é uma antena capaz de transmitir ou receber energia de maneira uniforme em todas as direções em um plano.

O diagrama de irradiação de uma antena omnidirecional é apresentado na Figura 1. Vê-se que, a potência irradiada é máxima e uniforme em direções contidas no plano horizontal em relação à antena, tendo desempenho reduzido no eixo longitudinal.

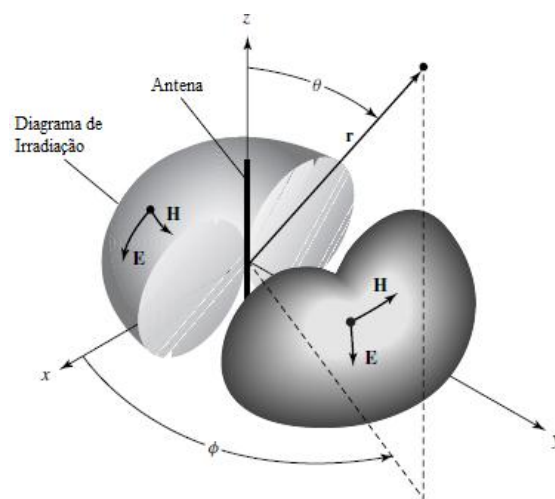


Figura 1: Diagrama de Irradiação Omnidirecional [4].

Normalmente, as antenas omnidirecionais são utilizadas quando se deseja captar e/ou irradiar ondas eletromagnéticas uniformemente em um plano, por exemplo, no plano paralelo à superfície da Terra, não havendo assim energia desperdiçada em direção ao plano ortogonal (teto e chão). Para isto, a antena deve estar orientada na vertical.

Estas também são empregadas quando a posição relativa do elemento cuja grandeza

deve ser medida é desconhecida ou arbitrária.

No caso específico, a antena idealizada deverá ser instalada convenientemente no plano horizontal dos elementos energizados da planta para captar a energia emitida pelas descargas parciais. Assim, não importando a direção a qual a antena estará direcionada, desde que esta esteja na orientada verticalmente.

Os tipos mais comuns de antenas omnidirecionais são as antenas monopolo e dipolo, antenas discone e antenas loop.

### 1.3. Antena de Banda Ultra Larga

Largura de banda descreve a faixa de frequências entre na qual a antena pode irradiar ou receber energia corretamente [4] (perdas menores que 10%, explicação no próximo capítulo).

No caso da antena idealizada, a largura de banda deve ir de 100MHz a 1GHz, devido às ondas emitidas pelas descargas parciais.

A largura de banda de uma antena é representada ou na forma de porcentagem, FB%, ou na forma de proporção, B:1. Se a antena opera entre as frequências de  $f_l$  (menor) e  $f_h$  (maior) então as representações FB% e B da largura, são dadas por: [5]

$$FB\% = 2 \frac{f_h - f_l}{f_h + f_l} \quad e \quad B = \frac{200 + FB}{200 - FB} = \frac{f_h}{f_l}$$

No caso específico, a antena requerida tem 163% ou 10:1 de largura de banda, o que a caracteriza como uma antena de banda ultra larga (FB% > 50%).

Os tipos de antenas mais comuns desenvolvidas para terem bom desempenho em larguras de banda ultra largas são as antenas independentes da frequência.

#### 1.3.1. Antenas Independentes da Frequência

Uma antena independente da frequência é aquela que a impedância de entrada, o diagrama de radiação e a polarização permanecem constantes mesmo com a variação da frequência [6], ou seja, mesmo com mudanças no comprimento de onda a partir da variação do tamanho físico da antena.

Experiências mostraram que, se uma antena que pode ser definida apenas em termos de dimensões geométricas angulares esta terá seu comportamento eletromagnético independente da frequência [7].

Uma antena definida apenas em termos de dimensões angulares é aquela que, se aplicado um fator de escala à forma geométrica de sua estrutura condutora esta mantém a mesma estrutura da original.

Três classes principais de antenas satisfazem esta condição:

- Antenas Cônicas: Dipolos (e monopolos) cujas estruturas condutoras sejam cones, de tamanho tendendo ao infinito, alimentados pelo vértice.
- Antenas Equiangulares: Dipolos cujas estruturas condutoras sejam superfícies em espiral.
- Antenas Logarítmicas: Antenas que utilizam escalas logarítmicas na sua composição.

#### 1.4. Conclusão

A antena a ser construída durante a realização deste trabalho precisa não apenas de um bom desempenho na detecção, mas também uma instalação conveniente. Para isto, preferivelmente, esta deve ter dimensões pequenas.

A confecção da antena idealizada traz dois grandes desafios: o primeiro é a junção das características acima discutidas em uma só antena; e o segundo é que esta tem que ser de tamanho reduzido, sendo que os comprimentos de onda, fator que influencia diretamente nas dimensões da antena, se situam nas frequências da banda desejada 100MHz a 1GHz (de 30cm a 3m).

## Capítulo II – Simulação

### 2.1. Introdução

O projeto de implementação de antenas é baseado em duas etapas básicas: Simulação (protótipo simulável) e Testes físicos (protótipo físico).

O protótipo simulável tem como função estimar, num ambiente computacional, o comportamento esperado que terá a antena.

As vantagens deste protótipo dizem respeito à possibilidade de projetar e otimizar a antena antes de uma implementação física. Contudo, o modelo virtual pode vir a ter algumas divergências das condições reais, limitando assim a compatibilidade entre os protótipos real e simulável.

Neste contexto, as antenas propostas durante a realização deste trabalho foram simuladas e a apresentação dos detalhes técnicos básicos das simulações é o objetivo de estudo deste capítulo.

### 2.2. Etapas da simulação

Para a simulação e análise das antenas propostas, foi utilizado o *software* de simulações eletromagnéticas *Microwave-Studio CST*®. A simulação é composta por três etapas:

- Implementação estrutural: concerne a construção do protótipo teórico no ambiente do *CST*.
- Varredura dos parâmetros: variação dos valores de um parâmetro numa dada banda de análise. O objetivo desta etapa é estabelecer um intervalo de valores que possam ser utilizados na otimização da antena.
- Otimização: consiste na última etapa da simulação. Os valores dos parâmetros são otimizados numa determinada banda de análise obtendo os valores dos parâmetros mais adaptados às condições desejadas.

### 2.3. Antena Impressa

Em um primeiro momento, o estudo bibliográfico permitiu conhecer melhor os diferentes tipos de antenas.

Durante este estudo, se buscou escolher um tipo de antena, a ser concebida durante a realização deste trabalho, de baixa complexidade de realização.

A antena *microstrip*, ou antena impressa foi escolhida para este projeto, por apresentar várias vantagens diante de outros tipos de antenas, como: baixo volume, baixo peso, baixo perfil, facilidade de construção, conservação da estética do equipamento, baixo custo de fabricação e compatibilidade com processos de fabricação utilizados em microeletrônica.

A tecnologia das antenas impressas pode ser utilizada em quase todos os exemplos de antenas, tornando-os modelos em duas dimensões (2D), muitas vezes chamados de planares.

Estas são construídas em cima de substratos, os quais interferem diretamente no seu desempenho, e têm dimensões definidas segundo a teoria de antenas.

#### 2.4. Implementação

Para a construção do protótipo simulável, no caso específico, necessitou-se de três elementos básicos:

- Substrato: constitui o plano físico de construção da antena. Disposto em formato retangular de tamanho variável, dependente da antena, é constituído pelo material FR4 com permissividade  $\epsilon_r = 4,3$  e espessura  $h = 1,6\text{mm}$ ;
- Antena: constituída pelo material metálico PEC de espessura  $h_m = 0,035\text{mm}$ ;
- Porta de Alimentação: porta discreta ideal de impedância variável, a fim de estabelecer o casamento com a impedância da antena.

#### 2.5. Parâmetros de análise

Para descrever o desempenho de uma antena, a avaliação de vários parâmetros é necessária [4]. No caso específico, as especificações da diretividade do diagrama de irradiação da antena e do seu coeficiente de reflexão serão suficientes para a descrição deste desempenho.

##### 2.5.1. Diretividade e Diagrama de Irradiação

O diagrama de irradiação de uma antena é definido como “uma função matemática ou uma representação gráfica das propriedades de radiação da antena como uma função de

coordenadas espaciais. Na maioria dos casos, o diagrama de radiação é determinado na região de campos distantes e é representado como uma função de coordenadas direcionais” [4].

O mapeamento da distribuição de energia irradiada é feito em duas ou três dimensões e deve ser função da posição do observador quando em um plano, deve descrever um arco correspondente a  $360^\circ$  em torno da antena. O diagrama de irradiação (em escala logarítmica em dB) representa a magnitude do campo elétrico ou magnético como uma função do espaço angular.

A diretividade de uma antena é a relação entre a intensidade de radiação em uma determinada direção e a intensidade da radiação média de todos os sentidos [4]. Mais simplesmente, esta define a capacidade que a antena tem de direcionar e concentrar a potência irradiada em certa direção do espaço, sendo a medida da focalização do lobo principal.

A diretividade pode ser expressa em decibéis (dB).

### 2.5.2. Parâmetros S

Os parâmetros S (do inglês *Scattering parameters*), ou parâmetros de espalhamento, são utilizados para descrever o comportamento de sistemas elétricos lineares em função do sinal de entrada [8].

Na Figura 2 é apresentado um sistema de duas portas, que interliga as ondas transmitidas com as ondas refletidas pelas portas do dispositivo.

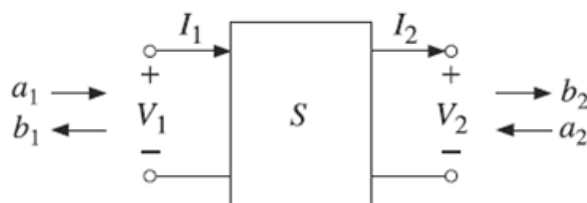


Figura 2: Sistema de duas portas.

Neste sistema, [S] é chamada de matriz de espalhamento do sistema de duas portas;  $S_{ij}$  são os parâmetros de espalhamento,  $a_1$  representa a onda incidente na porta 1 e  $b_1$  representa a onda refletida pela porta 1 [9].

Neste caso, a relação entre a onda incidente, a onda refletida e os parâmetros S é facilmente representada sob a forma matricial, como segue:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{1,1} & S_{1,2} \\ S_{2,1} & S_{2,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$

Ou seja:

$$b_1 = S_{1,1}a_1 + S_{1,2}a_2$$

$$b_2 = S_{2,1}a_1 + S_{2,2}a_2$$

Quando observamos os parâmetros de espalhamento, temos por objetivo verificar a adaptação e a transmissão sobre cada porta de um sistema.

Para o caso de uma antena tem-se um sistema com uma porta. Deste modo, o único parâmetro que deve ser considerado é o  $S_{1,1}$ , referente à potência refletida sobre a porta de alimentação.

Em dB, relação de  $20.\log(S_{1,1})$ , quanto maior o valor absoluto e negativo melhor é a transmissão, segundo a relação entre transmissão e reflexão, dada por:

$$S_{1,1} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0}$$

A relação de ondas estacionárias em termos de tensão VSWR (*voltage standing wave ratio*) é uma função do coeficiente de reflexão que descreve numericamente o quão bem a antena transmite sua potência. Esta é dada pela seguinte razão:  $VSWR = [(1 + \Gamma)/(1 - \Gamma)]$ , onde  $\Gamma$  é o coeficiente de reflexão.

Em geral, se o VSWR é inferior a 2 considera-se que a antena pode irradiar ou receber energia adequadamente. Um VSWR de 2:1 é equivalente a uma perda de retorno, expressa por  $PR = 10.\log|\Gamma|^2 = 20.\log|\Gamma|$ , de 10dB ( $S_{1,1} = -10\text{dB}$ ), nível em que 10% da potência incidente é refletida de volta para a fonte [10].

## 2.6. Conclusão

O *software* de simulações eletromagnéticas *Microwave-Studio CST®* fornece todas as ferramentas necessárias para a avaliação do desempenho das antenas teóricas. Sua utilização é simples e sua interface de fácil aprendizado.

Para uma manipulação satisfatória deste ambiente de simulação um estudo prévio e esforço prático são requeridos. No caso específico, esta familiarização já havia sido adquirida devido à realização de trabalhos anteriores.

As antenas a serem simuladas, por serem impressas, são de fácil implementação virtual

e real.

Ao fim de cada simulação, a obtenção do parâmetro  $S_{1,1}$  e do diagrama de irradiação será de suma importância para consequente análise do desempenho da antena.



## Capítulo III – Apresentação das Antenas Simuladas

### 3.1. Introdução

Conhecendo as especificações da antena idealizada, pôde-se focalizar o estudo inicial sobre a teoria de antenas em modelos que são conhecidos por possuírem diagrama de irradiação omnidirecional e/ou largura de banda ultra larga. Esta última característica teve prioridade na pesquisa, por ser mais difícil de ser encontrada em antenas comuns. Para isto, as antenas independentes da frequência, conhecidas por possuírem largura de banda ultra larga, foram amplamente estudadas.

Inicialmente, não houve preocupação em relação ao tamanho físico da antena teórica simulada.

A apresentação das antenas escolhidas a serem simuladas é o objetivo deste capítulo.

### 3.2. Antena Bow-Tie

#### 3.2.1. Teoria

Formada pela colocação de dois cones de extensão infinita alimentados pelos seus vértices, a antena bicônica é uma configuração simples que pode ser utilizada para alcançar características de banda larga.

Uma aproximação geométrica da antena bicônica é feita por meio de uma secção meridiana dos cones que compõem a mesma resultando em uma antena, como apresentada na Figura 3, denominada de antena bow-tie.

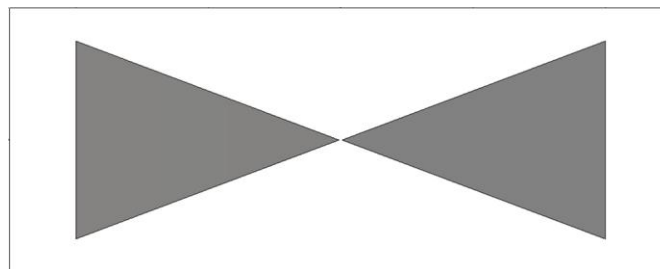


Figura 3: Modelo da Antena Bow-Tie Simulada.

A principal vantagem da antena bow-tie é seu simples design. Esta é composta por duas folhas de metal em formato triangular ligadas por uma alimentação em seus vértices, e é

definida pelo ângulo  $\alpha$  do vértice superior.

Teoricamente, este tipo de antena seria de frequência independente se estendesse suas dimensões até o infinito em ambos os lados.

Na prática isto não acontece, para fabricar uma antena bow-tie devem-se estabelecer dimensões finitas dos braços da antena e da abertura entre os pontos de alimentação. Esta manipulação limita a largura de banda variando consideravelmente a impedância da antena devido ao que é chamado de "efeito final". Porém, normalmente, a antena pode ser trucada (cada braço) em um quarto de comprimento de onda efetivo,  $\lambda_{\text{eff}}/4$ , sem um efeito significativo sobre o diagrama de irradiação ou a impedância. Sendo o  $\lambda_{\text{eff}}$  valor do comprimento de onda propagada no meio do substrato, no caso, para a menor frequência de operação.

### 3.2.2. Parâmetros Variáveis e Constantes na Simulação

Para utilização na aplicação requerida, teoricamente cada braço da antena, para a frequência de operação de 100MHz ( $\lambda_{\text{eff}} = 1,45\text{m}$ ), deve ter 36,25cm. Esta altura foi fixada de modo a formar um comprimento total de metade do  $\lambda_{\text{eff}}$ .

Os parâmetros variados na etapa de otimização da simulação desta antena são o ângulo  $\alpha$  do vértice superior dos triângulos e a distância de separação entre eles.

## 3.3. Antena Log-Periódica Planar

### 3.3.1. Teoria

Baseados no princípio das antenas independentes da frequência que se uma estrutura condutora torna-se igual a si mesma pela aplicação de um particular fator de escala  $\tau$  às suas dimensões, então a estrutura terá as mesmas propriedades eletromagnéticas nas frequências  $f$  e  $f\tau$ , em 1957, DuHamel e Isbell propuseram a Antena Log-periódica planar [11].

A antena log-periódica planar é uma simples modificação de uma antena angular bow-tie (inserção de elementos de arco de círculos dispostos em escala logarítmica). Esta modificação reduz os efeitos causados pelo truncamento não ideal das antenas bow-tie, inferindo a estas a característica de melhor largura de banda.

O design desta é apresentado na Figura 4, e é função dos parâmetros  $\tau$ ,  $\sigma$ ,  $\alpha$  e  $\beta$ , definidos pelas seguintes relações:

$$\tau = \frac{R_{n+1}}{R_n} \qquad \sigma = \frac{r_n}{R_n}$$

$$\alpha + \beta = 90^\circ$$

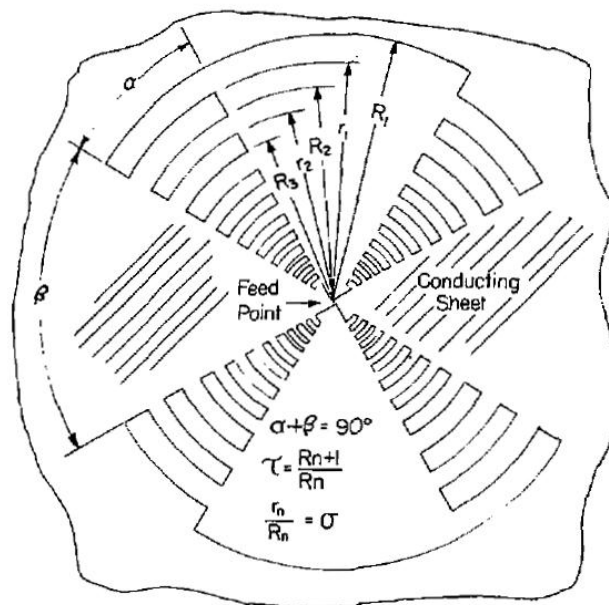


Figura 4: Estrutura de configuração Experimental da Antena Log-Periódica Planar [11].

O valor do parâmetro  $\tau$  deve ser teoricamente menor que 1, mas deve ser próximo deste número.

Para todos os modelos simulados a proporção  $\sigma$  foi considerada igual à raiz quadrada da relação  $\tau$ , proporcionando assim uma relação de largura de ‘dente’, pedaços de arco de círculos, que é a mesma para todas as fileiras de dentes.

A relação entre  $\alpha$  e  $\beta$  deve ser mantida e é normalmente dada por  $\alpha = 45^\circ$  e  $\beta = 45^\circ$ . Notando que, a variação do parâmetro  $\alpha$  para mais irá inferir à antena maior superfície física, deste modo, diminuindo a frequência mínima de operação e vice-versa.

Pela lei de formação da estrutura temos que, o raio  $R_1$  irá determinar o limite inferior de frequência, para isto este deve ter valor igual a  $\lambda_{\text{eff}}/4$  nesta frequência, e o menor dos ‘dentes’, próximo ao centro do modelo, deve determinar o limite superior de frequência de operação, para isto, o  $r_n$  deve ser igual a  $\lambda_{\text{eff}}/4$  nesta frequência. Deste modo, o valor  $n$  é determinado após a comparação dos resultados das iterações entre  $\sigma$  e  $R_n$  com o valor teórico desejado para  $r_n$ .

### 3.3.2. Parâmetros Variáveis e Constantes na Simulação

O modelo da antena log-periódica planar que foi simulado é apresentado na Figura 5.

Os valores fixados para a construção deste protótipo foram  $\tau = 0,9$  e  $\sigma = 0,81$  e, a partir do valor de  $\lambda_{\text{eff}}/4$  na frequência de 1GHz,  $R_1 = 362,5\text{mm}$ . Deste modo, facilmente encontramos que  $n = 11$  por  $r_{11} = 35,7\text{mm}$ , sendo teoricamente  $\lambda_{\text{eff}}/4$  na frequência de 100MHz igual a 36,25mm.

O  $\alpha$  foi o único parâmetro variável do protótipo teórico, uma vez que fixada a relação de  $\alpha + \beta = 90^\circ$  sua variação varia o  $\beta$ .

Variamos ainda a distância entre os dois braços da antena, onde a alimentação é colocada.

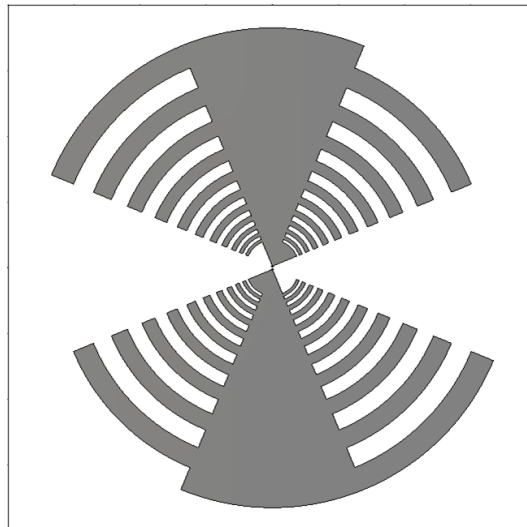


Figura 5: Modelo da Antena Log-Periódica Planar Simulada.

## 3.4. Antena Espiral de Arquimedes

### 3.4.1. Teoria

Em busca de maiores larguras de banda, protótipos em espiral começaram a serem apresentados como antenas independentes da frequência.

Um dos modelos mais simples utilizados para este fim foi o da Espiral de Arquimedes. Em coordenadas polares, a espiral de Arquimedes pode ser simplesmente descrita pela

seguinte equação:

$$\rho = \rho_0 \theta$$

Na Figura 6, dois braços da antena espiral de Arquimedes são dispostos entrelaçados de modo a restar uma distância no centro entre cada. A alimentação da antena é colocada diretamente através entre os dois braços da espiral.

A curva que descreve cada braço da espiral é proporcional ao ângulo  $\theta$  e é descrita pelas seguintes relações:

$$\rho = \rho_0 \theta + \rho_1$$

$$\rho = \rho_0 (\theta - \pi) + \rho_1,$$

onde  $\rho_1$  é o raio interno da espiral e  $\rho_0$  é o maior raio.

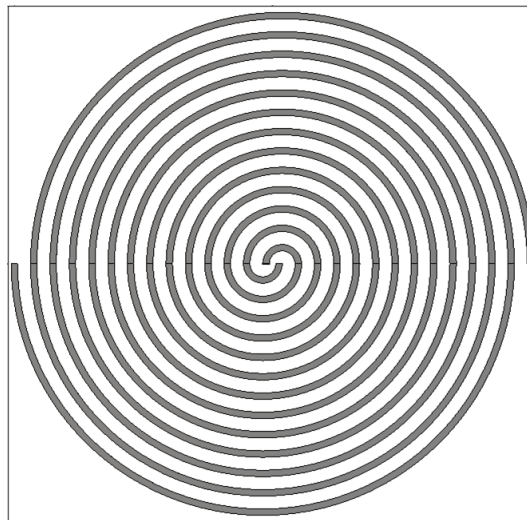


Figura 6: Modelo da Antena Espiral de Arquimedes Simulada.

A menor frequência de operação da espiral é determinada teoricamente pelo raio externo e a maior frequência de operação é dada pelo raio interno, estas são dadas por:

$$f_l = \frac{c}{2\pi\rho_0} \qquad f_h = \frac{c}{2\pi\rho_1}$$

onde  $c$  é a velocidade da luz.

Na prática a menor frequência de operação da espiral pode ser maior que aquela dada pela equação acima devido às reflexões que ocorrem ao final da espiral. Também, o limite de frequência superior pode ser menor que aquele dado pela equação devido aos efeitos da região de alimentação.

### 3.4.2. Parâmetros Variáveis e Constantes na Simulação

De acordo com a teoria, para a banda de frequências de operação da antenna idealizada, de 100MHz a 1GHz, a estrutura da Antena Espiral de Arquimedes deve ter um raio interno  $\rho_1$  de  $\rho_1 = 2,3\text{cm}$  e um raio externo  $\rho_0$  de  $\rho_0 = 23\text{cm}$ , considerando a permissividade do FR4 do substrato.

Durante a simulação a largura do fio que forma os braços e a distância entre estes foram os parâmetros variados.

### 3.5. Antena Discone Planar

#### 3.5.1. Teoria

A antenna discone, variação da antenna bicônica, é formada por um disco e um cone ligados entre si por uma alimentação central. Analogamente às antenas anteriormente apresentadas, esta é independente da frequência tendo características quase constantes de impedância e diagrama de radiação em uma banda larga.

Uma aproximação geométrica da antenna discone foi feita por meio de uma secção meridiana do cone e do disco, que compõem a mesma, resultando em uma antenna, como apresentada na Figura 7, denominada por mim de Antena Discone Planar.

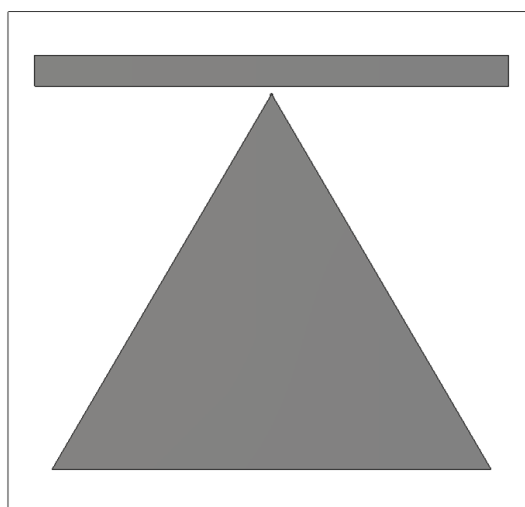


Figura 7: Modelo da Antena Discone Planar Simulada.

Por não ser uma antenna conhecida a teoria de formação da antenna discone planar será baseada na teoria da antenna discone em 3D.

As dimensões geométricas de uma antena discone são teoricamente especificadas por:

- O diâmetro total do disco, no caso específico o comprimento do retângulo, deve ser 0,175 vezes do comprimento de onda da frequência mínima da antena.
- O comprimento do cone, no caso específico a hipotenusa do triângulo, deve ser um quarto do comprimento de onda de frequência da antena mínima de funcionamento.
- O ângulo de cone deve ser de 60 graus, formando, no caso específico, um triângulo equilátero.

Devido ao seu design simples, facilidade de instalação e características de banda larga atrativa este tipo de antena tem amplas aplicações nos espectros de VHF (30-300 MHz) e de UHF (300 MHz-3 GHz).

### 3.5.2. Parâmetros Variáveis e Constantes na Simulação

Sabendo que modificações deveriam ser aplicadas à nova antena proposta, para que esta tivesse o desempenho ótimo desejado, os únicos parâmetros fixados foram o comprimento da hipotenusa do triângulo, em  $\lambda/4 = 75\text{cm}$  para a menor frequência de operação de 100MHz, e o ângulo do vértice superior deste, em  $60^\circ$ .

Simulações foram executadas variando-se a largura e o comprimento do retângulo, representação do disco, e a distância entre o triângulo e o retângulo.

### 3.6. Conclusão

Após a apresentação nas antenas a serem simuladas, nota-se que, as antenas independentes da frequência foram tomadas como referência, já que as utilizando é possível atingir larguras de banda na ordem de 10:1 como a idealizada.

Outra característica em comum destas antenas, que não foi explorada nesta apresentação, é que estas tendem a possuir um diagrama de irradiação bidirecional, sendo mais diretivo do que se é desejado. Tal característica não interferiu no andamento do estudo e das simulações, sendo visto como um desafio a ser superado.

Seguindo as etapas de simulação, os quatro tipos de antenas apresentados foram implementados estruturalmente possuindo parâmetros fixos e variáveis. Estes foram verificados na etapa de varredura dos parâmetros e foram posteriormente otimizados para um melhor desempenho da antena.

## Capítulo IV – Resultados das Simulações das Antenas

### 4.1. Introdução

A partir das simulações das antenas propostas, para as quais foi utilizado o *software* de simulações eletromagnéticas *Microwave-Studio CST®*, e após a etapa de otimização de todos os parâmetros variáveis para cada antena, foi possível obter os valores e gráficos correspondentes ao melhor desempenho adquirido pelas antenas.

Tais gráficos são gerados automaticamente pelo software após as simulações, que foram realizadas na banda de 0 a 1GHz para melhor visualização dos resultados.

Como o objetivo do trabalho era o da obtenção de uma antena de largura de banda ultra larga, que compreendesse a banda de 100MHz a 1GHz das ondas emitidas pelas descargas parciais, e omnidirecional, ou seja, irradiar ou captar energia uniformemente em todas as direções no plano horizontal da antena, para a análise do desempenho das antenas foram focados apenas os gráficos de diretividade no plano horizontal da antena e dos parâmetros  $S_{1,1}$ .

Os gráfico dos parâmetros  $S_{1,1}$  são apresentados para toda a banda de frequência simulada, onde será possível analisar a variação do coeficiente de reflexão e, por conseguinte, a largura de banda de cada antena.

Os diagramas de irradiação foram plotados apenas no plano horizontal, pois com apenas este já é possível determinar a característica omnidirecional da antena. Estes padrões mostram o comportamento da distribuição da energia no espaço em função da variação da frequência na banda desejada. Por estes, pode-se verificar as perdas de energia no plano. Será considerada a perda da omnidirecionalidade a partir de perdas de -2,5dB, tomando o maior valor como referência.

A apresentação dos gráficos resultantes para cada antena e a conseqüente análise e comparação dos mesmos é o objetivo deste capítulo.

### 4.2. Antena Bow-Tie

Durante a execução das simulações a altura dos triângulos foi fixada em  $x_r = 36,25\text{cm}$ , de modo a formar um comprimento total de metade do  $\lambda_{\text{eff}}$ .

O ângulo  $\alpha$  do vértice superior dos triângulos e a distância de separação entre eles foram



otimizados e apresentaram valores de  $\alpha = 40^\circ$  e  $n = 5\text{mm}$ .

Após otimização dos parâmetros da antena obteve-se os seguintes gráficos da diretividade para seis diferentes frequências entre a banda de 100MHz e 1GHz e do parâmetro S1,1 para esta banda.

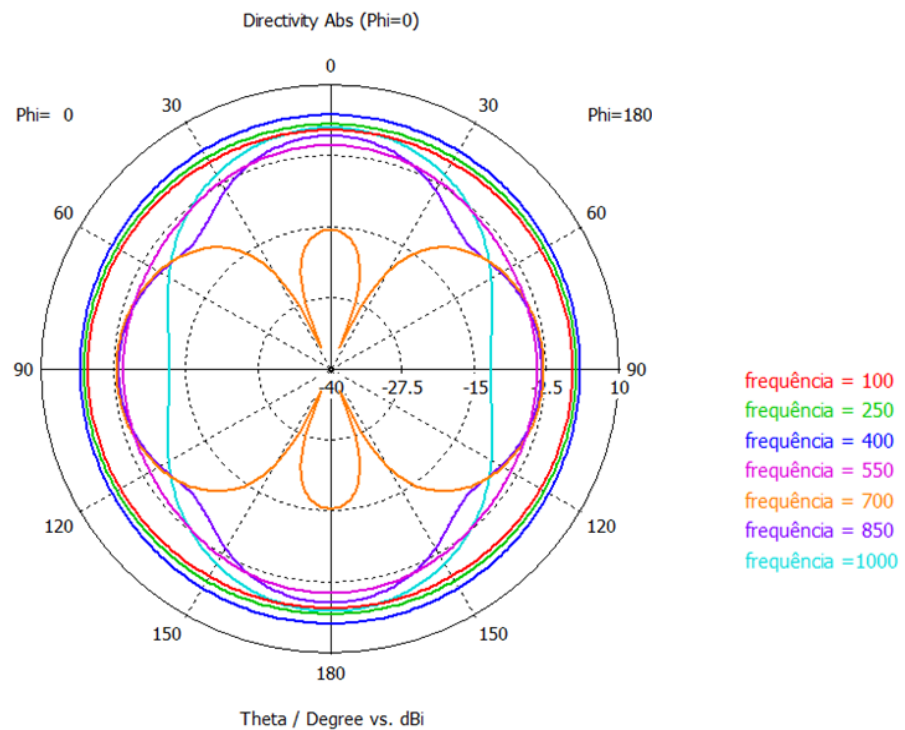


Figura 8: Diagrama de Irradiação (Diretividade) da Antena Bow-Tie na banda de frequências de 100MHz a 1GHz.

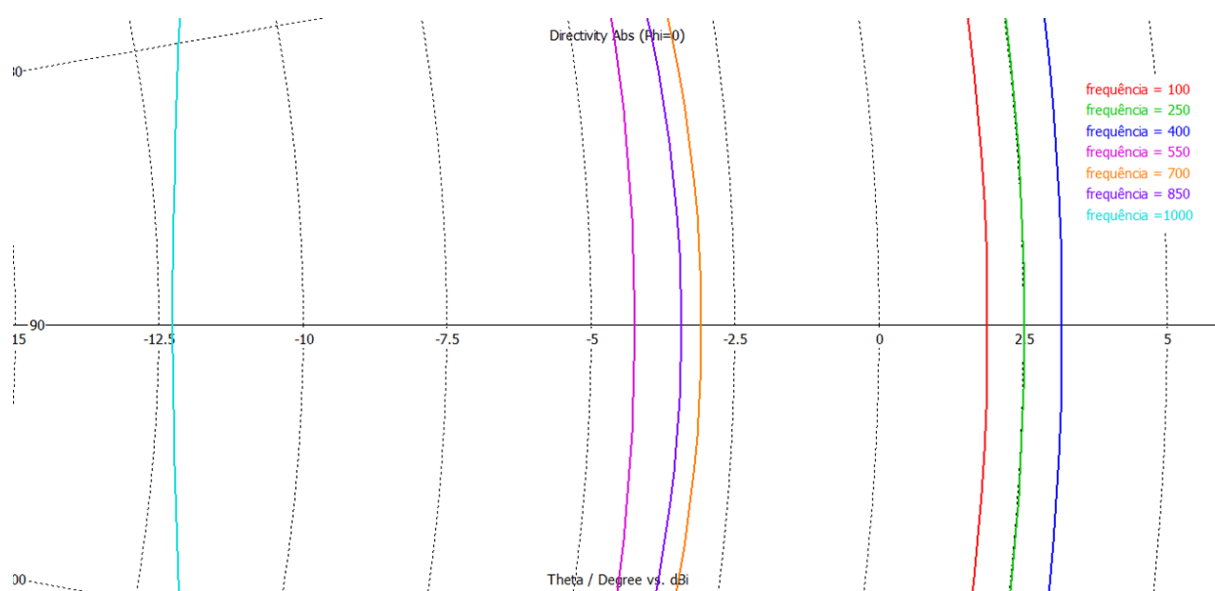


Figura 9: Zoom do Diagrama de Irradiação da Figura 8.

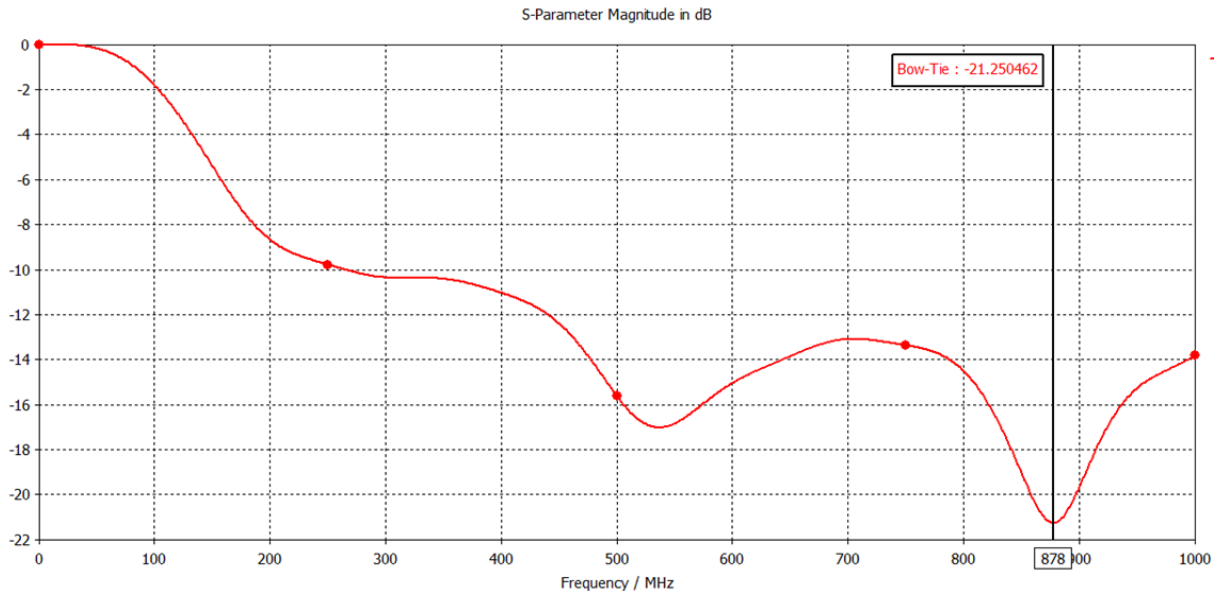


Figura 10: Parâmetro S<sub>1,1</sub> da Antena Bow-Tie.

Analisando os gráfico da Figura 8, e o consequente zoom na Figura 9, pode-se observar que a antena deixa de ser omnidirecional na frequência de 550MHz. Visto que, o seu diagrama apresenta a partir desta frequência uma queda de mais de 7dB.

A partir da Figura 10, pode-se obter os dados descritivos abaixo para a Antena Bow-Tie:

### Bow-Tie

Frequência da Melhor Ressonância: 878 MHz

Menor Energia Refletida: -21,25dB ou 0,76%

Melhor S<sub>1,1</sub>: 0,087

Melhor VSWR: 1,19:1

### 4.3. Antena Log-Periódica Planar

De acordo com a teoria, os valores fixados durante a simulação desta antena foram:  $\tau = 0,9$ ,  $\sigma = 0,81$  e  $R_1 = 362,5\text{mm}$ ,  $n = 11$  e  $r_{11} = 35,7\text{mm}$ . O ângulo  $\alpha$  da estrutura teórica e a distância 'd' entre os dois braços da antena, onde a alimentação é colocada, foram otimizados e apresentaram os seguintes valores:  $\alpha = 45^\circ$  e  $d = 5\text{mm}$ .

Após otimização dos parâmetros da antena obteve-se os seguintes gráficos da diretividade para seis diferentes frequências entre a banda de 100MHz e 1GHz e do parâmetro S<sub>1,1</sub> para esta banda.

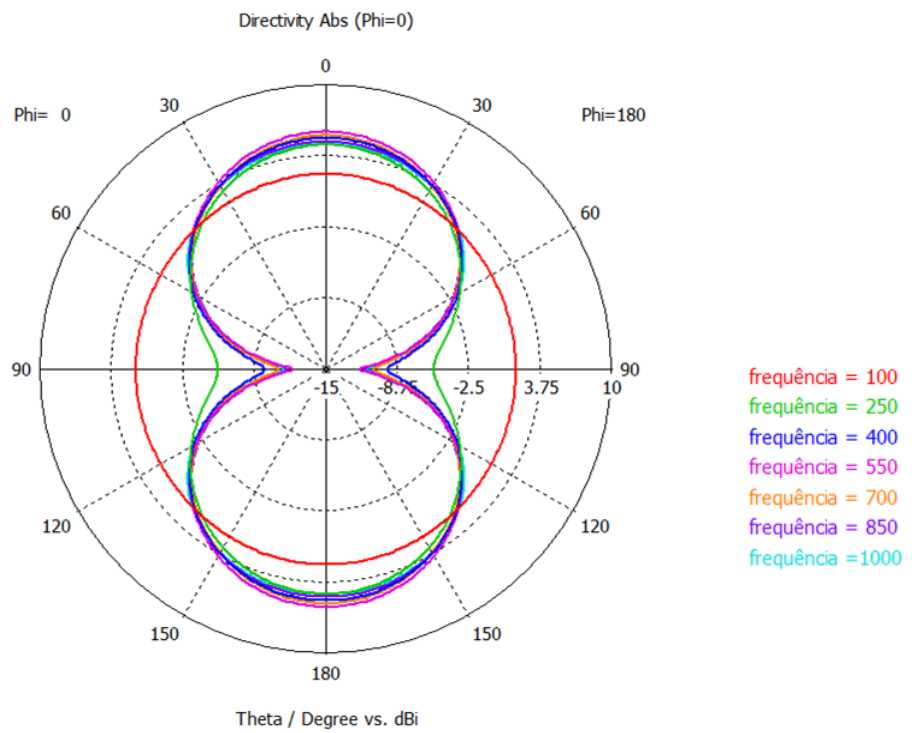


Figura 11: Diagrama de Irradiação (Diretividade) da Antena Log-Periódica Planar na banda de frequências de 100MHz a 1GHz.

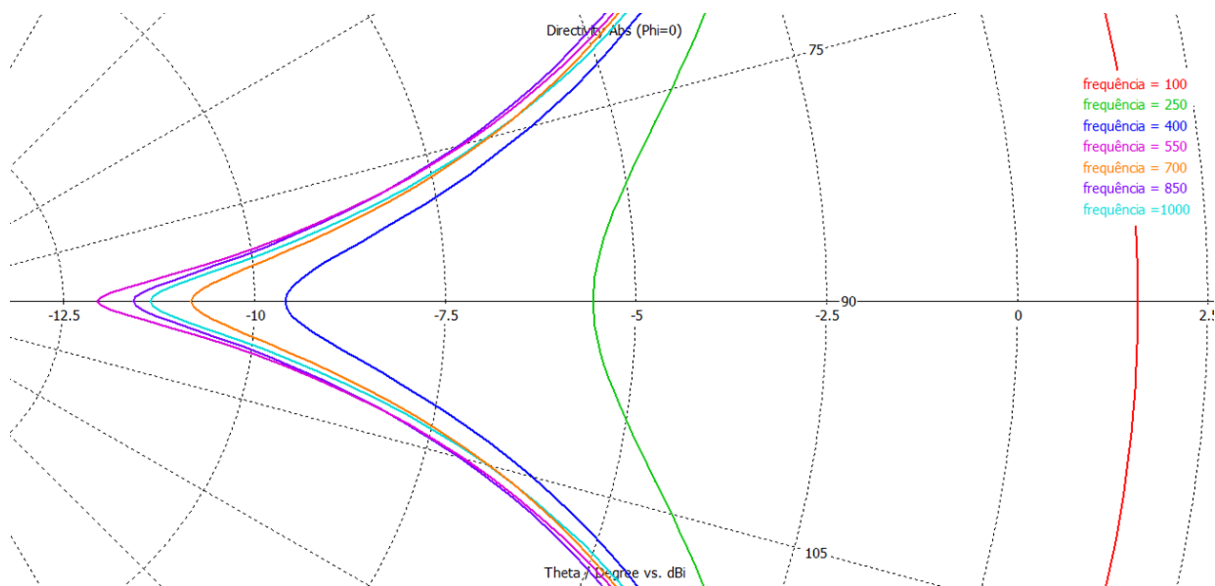


Figura 12: Zoom do Diagrama de Irradiação da Figura 11.

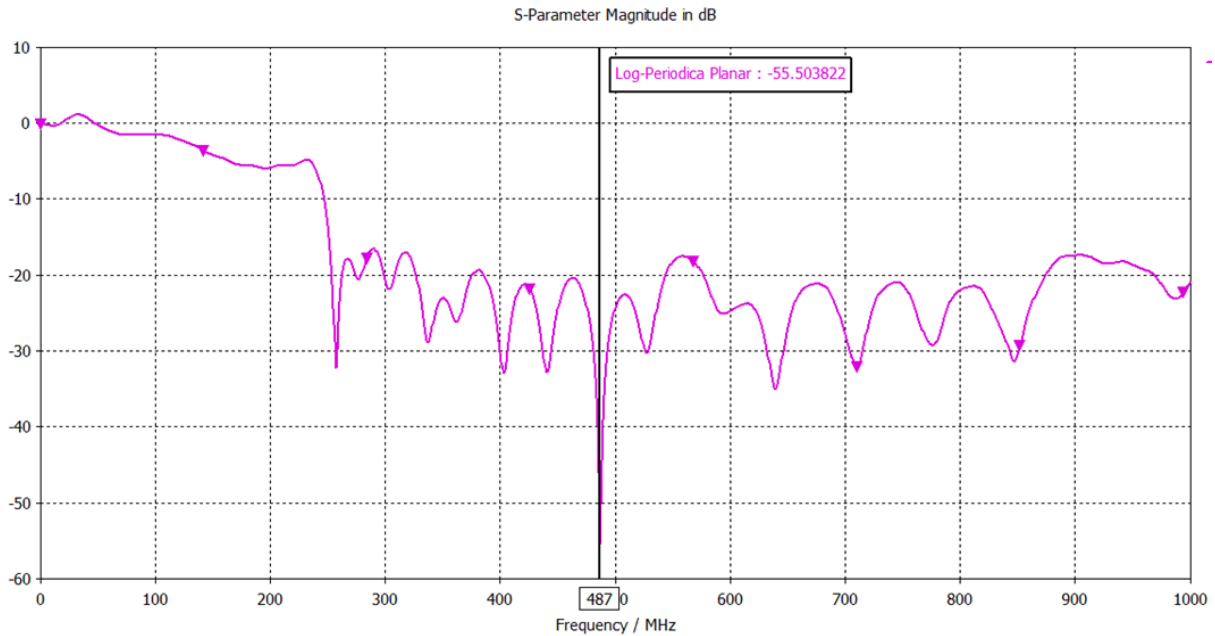


Figura 13: Parâmetro  $S_{1,1}$  da Antena Log-Periódica.

Analisando os gráfico da Figura 11, e o conseqüente zoom na Figura 12, pode-se observar que a antena deixa de ser omnidirecional na frequência de 250MHz. Visto que, o seu diagrama apresenta a partir desta frequência uma queda de mais de 6dB.

A partir da Figura 13, pode-se obter os dados descritivos abaixo para a Antena Log-Periódica Planar simulada:

### Log-Periódica

Frequência de melhor ressonância: 487 MHz

Menor Energia Refletida: -55,5dB ou 0,0003%

Melhor  $S_{1,1}$ : 0,0017

Melhor VSWR: 1,003:1

#### 4.4. Antena Espiral de Arquimedes

Durante a simulação, a fim de reduzir s as dimensões da antena, modificamos a banda de operação para 200MHz a 1GHz. Assim o raio interno  $\rho_1$  e o raio externo  $\rho_0$  da espiral tiveram valor de:  $\rho_1 = 2\text{cm}$  e  $\rho_0 = 10\text{cm}$ .

A largura do fio que forma os braços e a distância entre estes foram otimizados e tiveram valores iguais a 5mm.

Após otimização dos parâmetros da antena obteve-se os seguintes gráficos da diretividade para seis diferentes frequências entre a banda de 100MHz e 1GHz e do parâmetro S1,1 para esta banda.

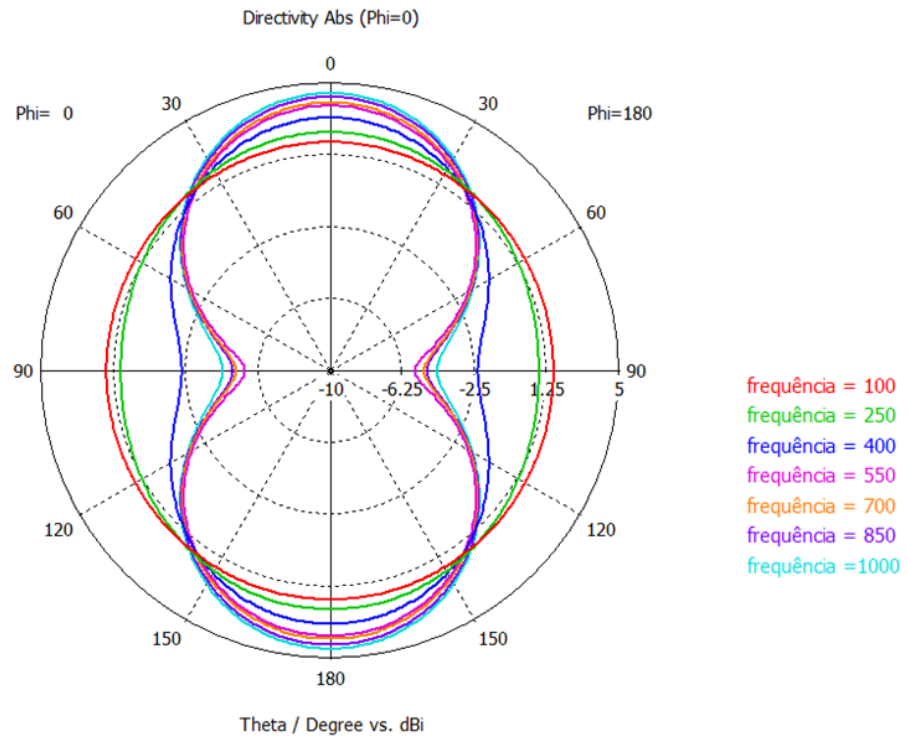


Figura 14: Diagrama de Irradiação (Diretividade) da Antena Espiral na banda de frequências de 100MHz a 1GHz.

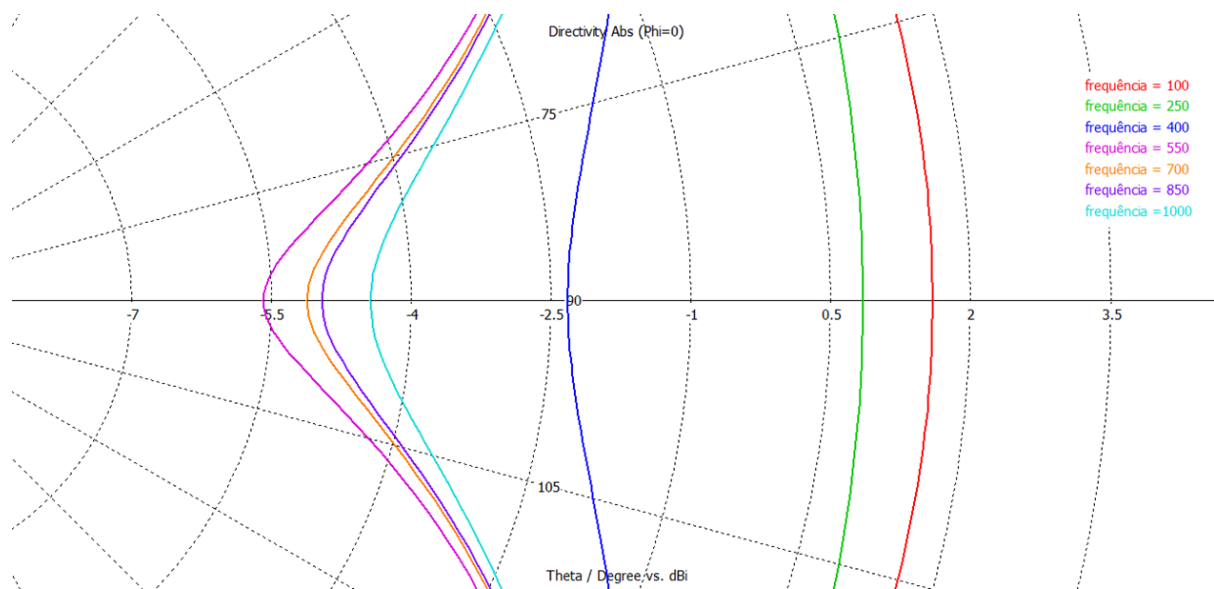


Figura 15: Zoom do Diagrama de Irradiação da Figura 14.

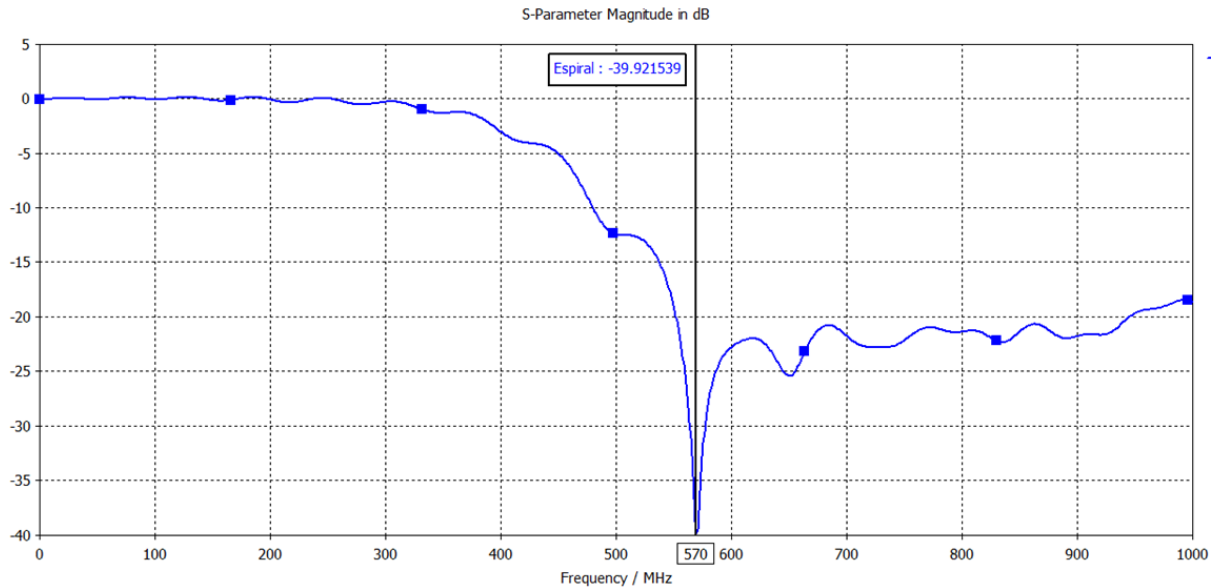


Figura 16: Parâmetro  $S_{1,1}$  da Antena Espiral.

Analisando os gráfico da Figura 14, e o conseqüente zoom na Figura 15, pode-se observar que a antena deixa de ser omnidirecional na frequência de 400MHz. Visto que, o seu diagrama apresenta a partir desta frequência uma queda de mais de 3dB.

A partir da Figura 16, pode-se obter os dados descritivos abaixo para a Antena Espiral:

### Espiral

Frequência de melhor ressonância: 570 MHz

Menor Energia Refletida: -39,92dB ou 0,01%

Melhor  $S_{1,1}$  : 0,01

Melhor VSWR: 1,02:1

### 4.5. Antena Discone Planar

Mais uma vez, a fim de reduzir as dimensões da antena, modificamos a banda de operação para ter menor frequência de 300MHz. Para isto, o comprimento da hipotenusa do triângulo foi fixado em  $\lambda/4 = 25\text{cm}$ .

Ainda, o ângulo do vértice superior do triângulo foi  $60^\circ$  e a largura  $h$  e o comprimento  $L$  do retângulo foram otimizados, de modo que:  $h = 17,5\text{mm}$  e  $L = 27\text{cm}$ . A distância entre o triângulo e o retângulo foi de 4,5mm.

Após otimização dos parâmetros da antena obteve-se os seguintes gráficos da diretividade para seis diferentes frequências entre a banda de 100MHz e 1GHz e do parâmetro S1,1 para esta banda.

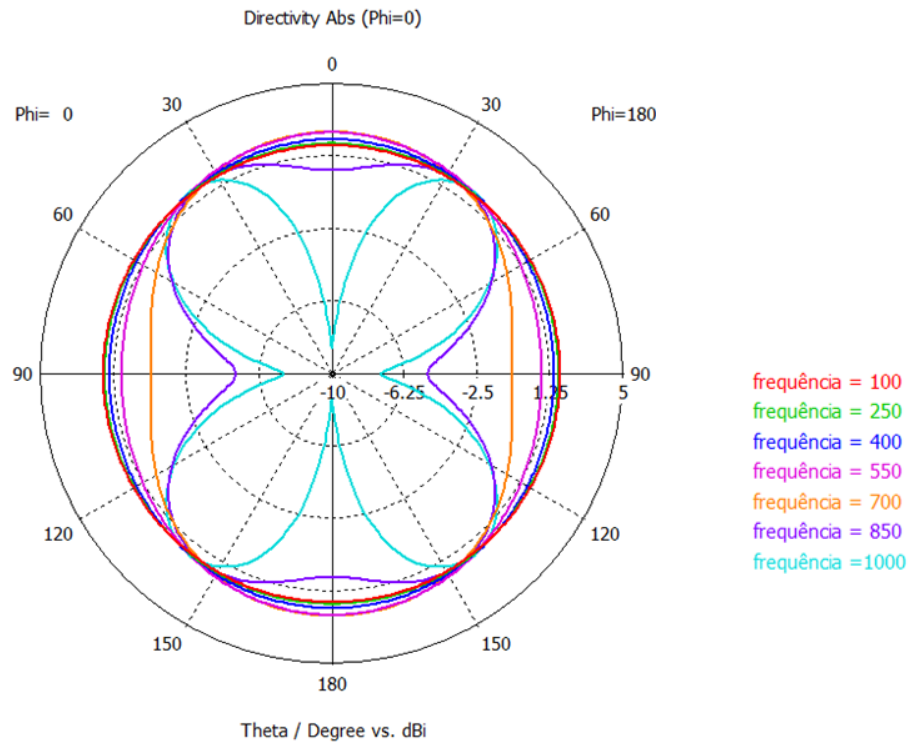


Figura 17: Diagrama de Irradiação (Diretividade) da Antena Discone Planar na banda de frequências de 100MHz a 1GHz.

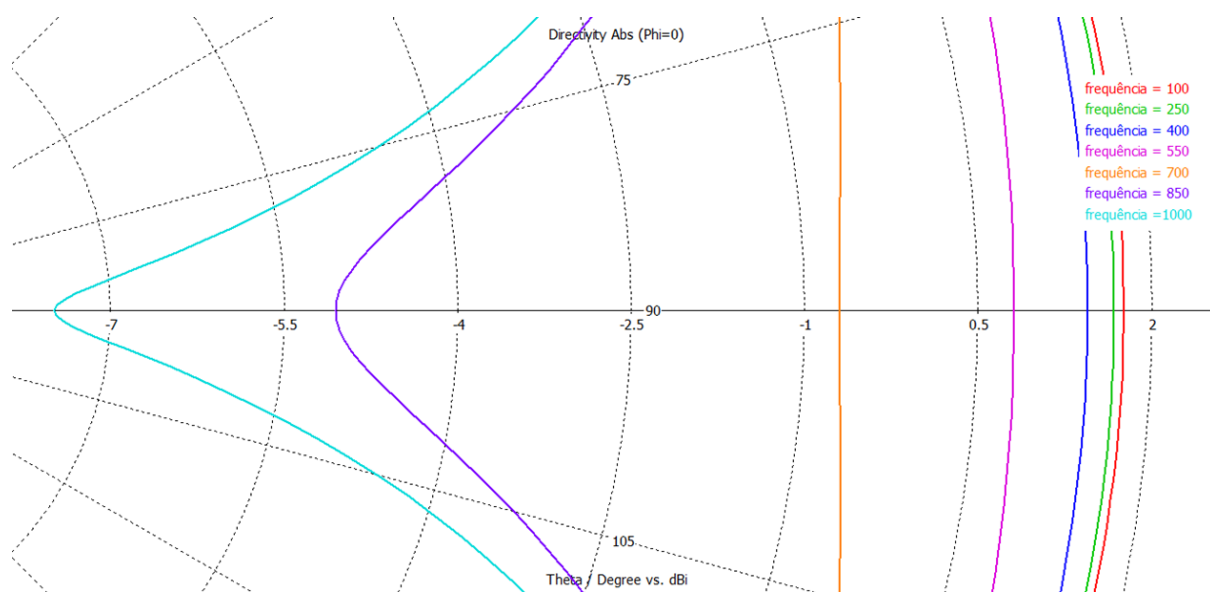


Figura 18: Zoom do Diagrama de Irradiação da Figura 17.

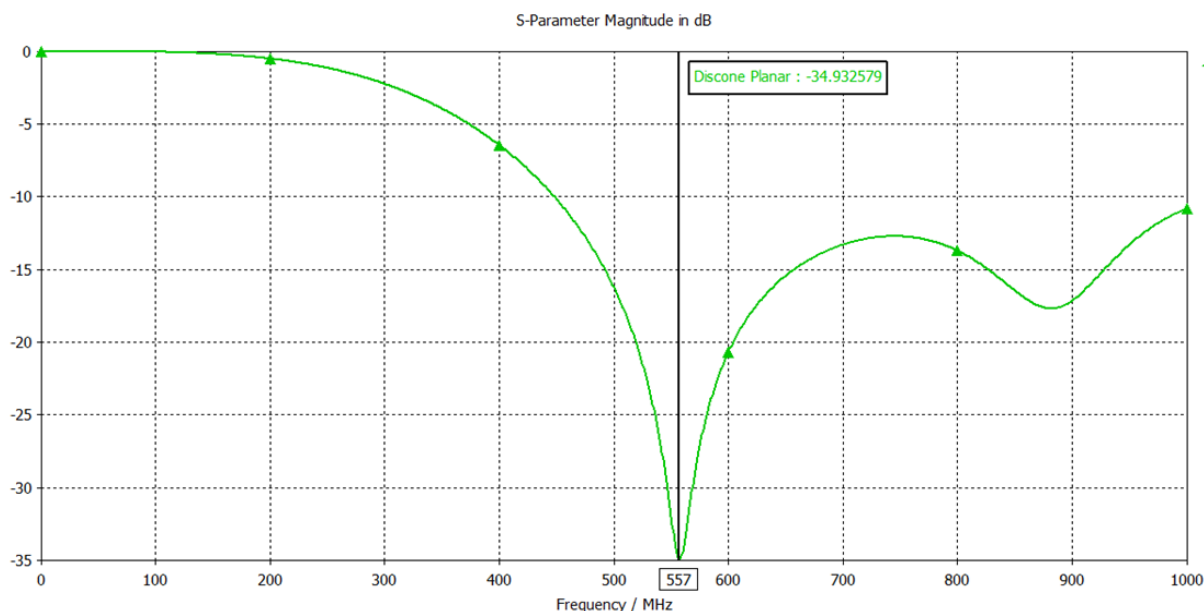


Figura 19: Parâmetro  $S_{1,1}$  da Antena Discone Planar.

Analisando os gráfico da Figura 17, e o conseqüente zoom na Figura 18, pode-se observar que a antena deixa de ser omnidirecional na frequência de 850MHz. Visto que, o seu diagrama apresenta a partir desta frequência uma queda de mais de 5dB.

A partir da Figura 19, pode-se obter os dados descritivos abaixo para a Antena Discone Planar simulada:

### Discone Planar

Frequência de melhor ressonância: 557 MHz

Menor Energia Refletida: -34,93dB ou 0,03%

Melhor  $S_{1,1}$  : 0,018

Melhor VSWR: 1,04:1

#### 4.6. Comparativo entre as Antenas Simuladas

A partir dos resultados das simulações, um comparativo entre os gráficos das quatro antenas apresentadas pode ser estabelecido.

Primeiramente, é mister plotar em uma mesma escala os quatro gráficos dos Parâmetros  $S_{1,1}$  e da Diretividade no plano horizontal do Diagrama de Irradiação.

Logo, nota-se que é necessário escolher uma frequência de referência para realizar a



comparação dos diagramas de diretividade. A frequência escolhida foi a de 550MHz por ser a frequência central da banda desejada.

Finalmente, os gráficos como desejados foram plotados e são apresentados a seguir juntamente com suas análises:

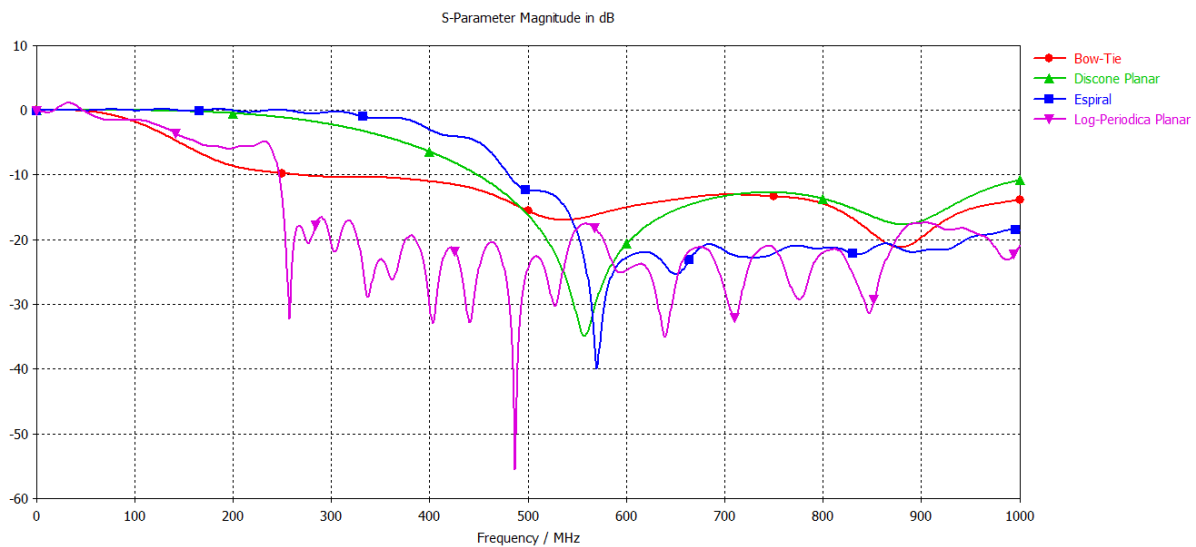


Figura 20: Parâmetros S<sub>1,1</sub> das quatro antenas apresentadas visualizados em uma mesma escala.

Observa-se que mesmo dimensionando as antenas para que estas comecem a ressoar em 100MHz, é só a partir de 500MHz que todas têm realmente o desempenho desejado com S<sub>1,1</sub> menor que -10dB. Todas as antenas mantêm até o fim da banda de operação (1GHz) esta boa característica.

A Antena Log-Periódica Planar é a que possui melhor largura de banda e menores perdas por reflexão.

Mesmo assim, as outras antenas também possuem bandas ultra largas, sendo esta, portanto, uma característica satisfatória para todas as antenas.

As antenas Log-Periódica Planar e Espiral são as que possuem o comportamento mais constante com a variação da frequência.

O comparativo individual das larguras de banda das quatro antenas é apresentado a seguir, e confirma que todas as antenas têm bandas na faixa de ultra larga (FB% > 50%).

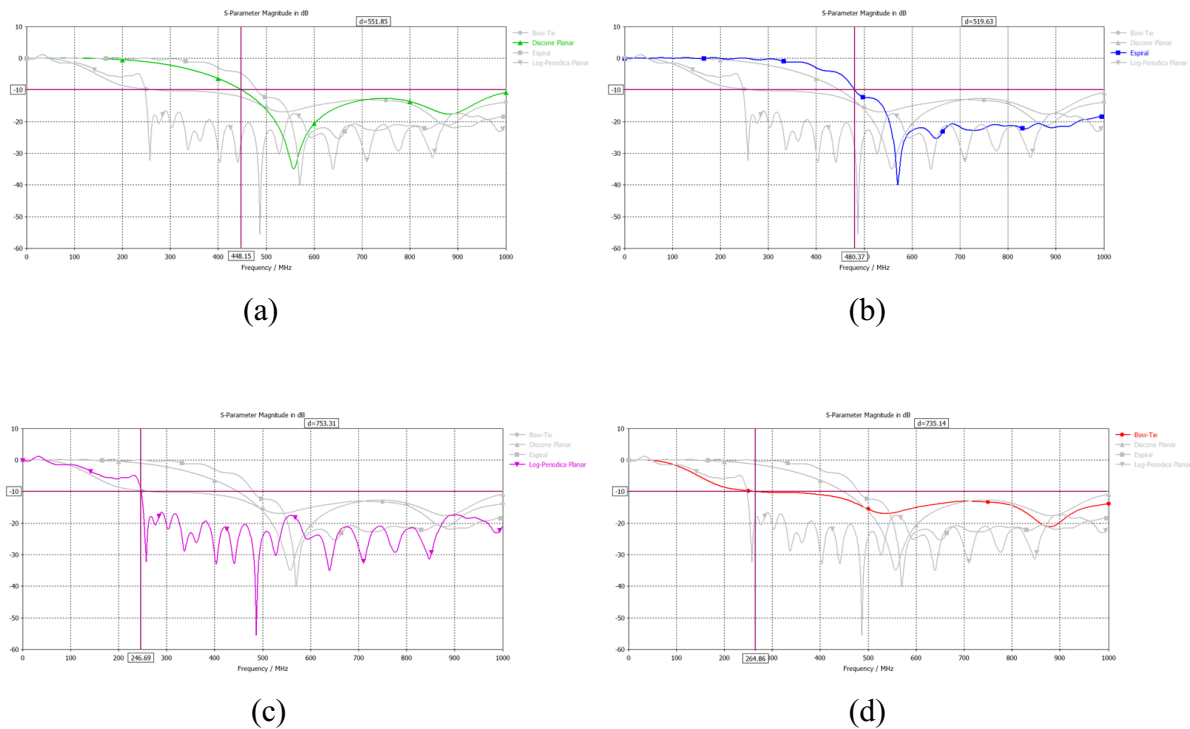


Figura 21: Comparativo relativo à Largura de Banda das quatro antenas apresentadas.

<p><b>(a) Discone Planar</b></p>	<p><b>(b) Espiral</b></p>
<p>Menor Frequência: 448,15MHz            Maior Frequência: 1GHz            Largura de Banda: 2,23:1 ou 76,20%</p>	<p>Menor Frequência: 480,37MHz            Maior Frequência: 1GHz            Largura de Banda: 2,1:1 ou 70,21%</p>
<p><b>(c) Log-Periódica</b></p>	<p><b>(d) Bow-Tie</b></p>
<p>Menor Frequência: 246,69MHz            Maior Frequência: 1GHz            Largura de Banda: 4:1 ou 121%</p>	<p>Menor Frequência: 264,86MHz            Maior Frequência: 1GHz            Largura de Banda: 3,78:1 ou 116,24%</p>

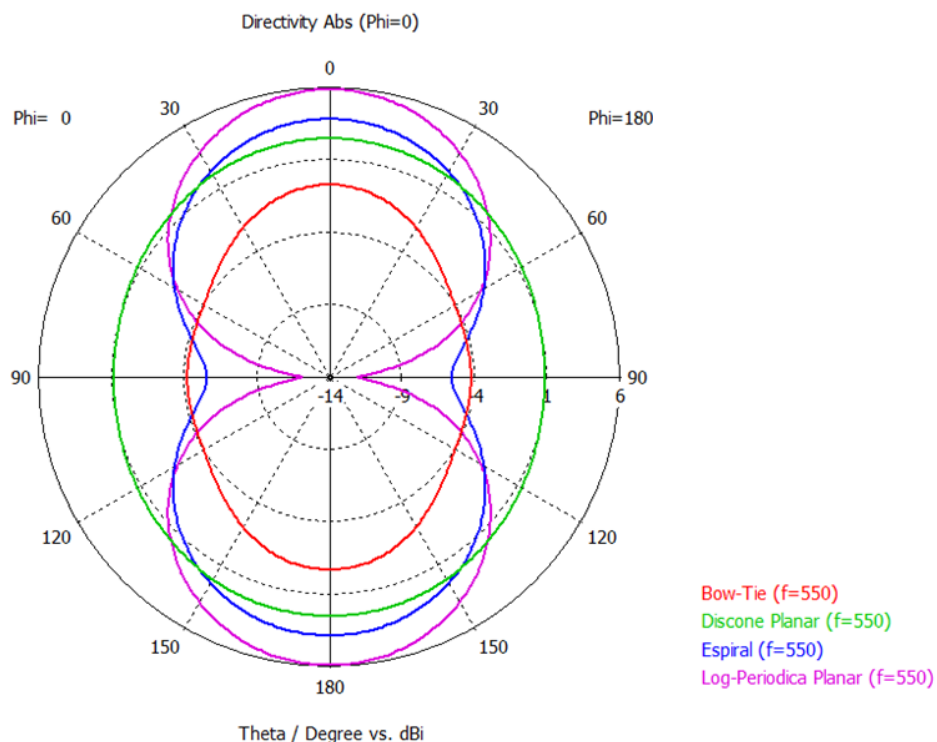


Figura 22: Comparativo entre os Diagramas de Irradiação (Diretividade), na frequência de 550MHz, das quatro antenas apresentadas.

Notoriamente, em termos de direcionalidade as antenas apresentadas possuem características distintas.

As antenas Log-Periódica Planar e Espiral confirmam a característica das antenas independente de frequência, mostrando-se bidirecionais.

Mas, como objetiva-se a confecção de uma antena omnidirecional, a antena que melhor se encaixa neste padrão é a Antena Discone Planar.

Esta foi a antena escolhida para ser proposta para confecção, uma vez que é a única que consegue, mesmo de forma não ideal, unir as duas características principais requeridas, com largura de banda de mais de 76% e relativa omnidirecionalidade até a frequência de 850MHz, como foi mostrado no item 4.5 deste capítulo.

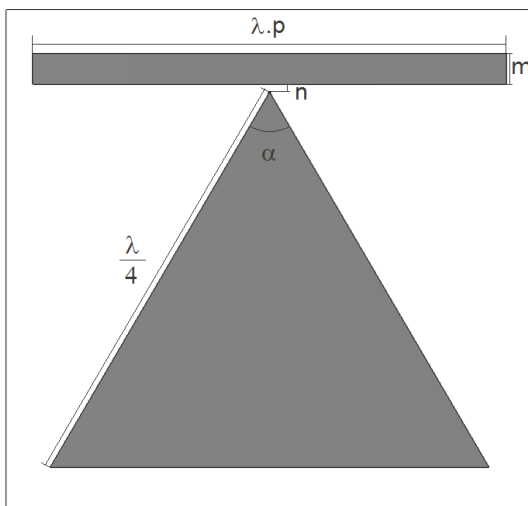
#### 4.7. Conclusão: Antena Proposta

A partir das simulações das antenas propostas, para as quais foi utilizado o *software* de simulações eletromagnéticas *Microwave-Studio CST®*, foi possível obter os valores e gráficos correspondentes ao desempenho das antenas e compará-los.

Observou-se que a Antena Discone Planar obteve os mais aceitáveis resultados diante das necessidades do projeto.

#### 4.7.1. Detalhes da Antena Proposta Simulada

Visando a produção, e uma possível reprodução, da Antena Discone Planar simulada, os detalhes da simulação são apresentados, a seguir:



Parâmetro	Valor
$\alpha$	$60^\circ$
$c$	$3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
$f$	300 MHz
$\lambda$	$c/f$
$m$	17,5 mm
$n$	4,5 mm
$p$	0,27
$x$	30 cm
$y$	30 cm

Figura 23: Disposição Geométrica, no plano x-y, da Antena Discone Planar Proposta.

#### 4.7.2. Impedância de Entrada da Antena

Para a realização da confecção da antena um parâmetro a mais deve ser focado, a impedância de entrada da antena.

Se a antena e seu sistema de alimentação não tiverem impedâncias casadas, ou seja, não tiverem a mesma impedância, o coeficiente de reflexão e as conseqüentes perdas aumentarão atingindo diretamente o desempenho da antena. A máxima transferência de energia pela antena requer um casamento entre as impedâncias do seu sistema.

Deste modo, analisou-se o gráfico apresentado na Figura 24, a fim de conhecer a varredura de parâmetros para a otimização da impedância da alimentação.

Constatou-se que a impedância de  $200\Omega$  na porta de alimentação foi a que mais ‘casou’ com a impedância da antena, uma vez que, é nesta que o gráfico do parâmetro  $S_{1,1}$  apresenta

menos perdas.

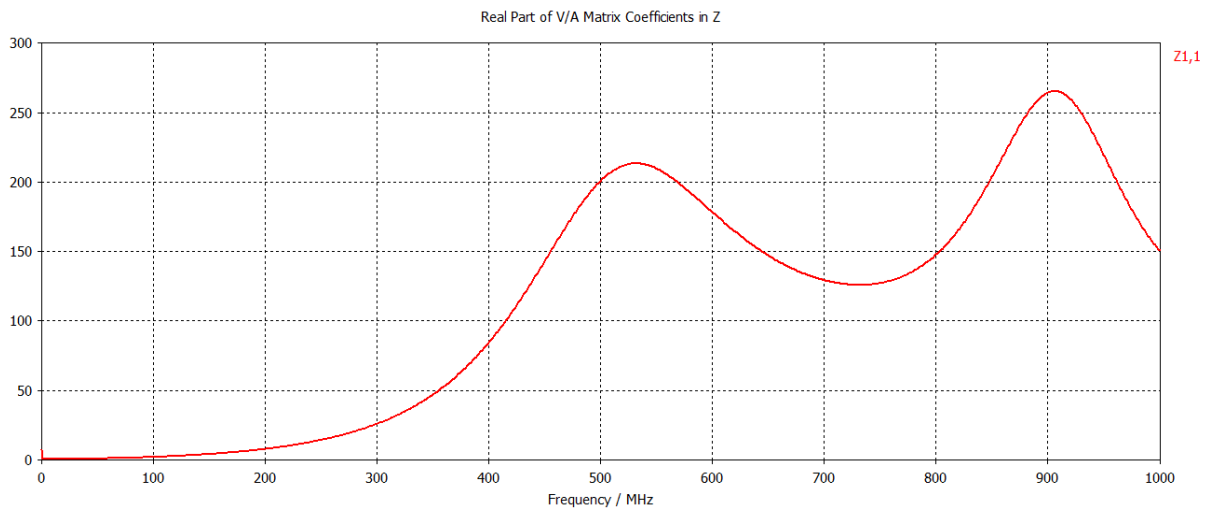


Figura 24: Impedância de Entrada da Antena Discone Planar.

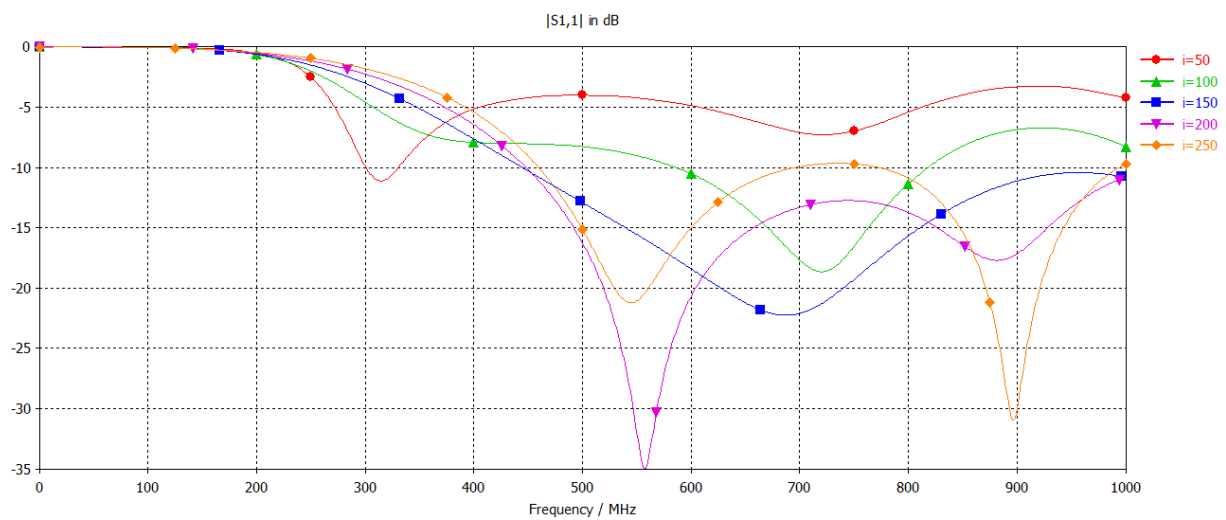


Figura 25: Parâmetros  $S_{1,1}$  da Antena Discone Planar em função da variação da impedância da porta de alimentação.

## Capítulo V – Confeção

### 5.1. Introdução

A antena proposta para ser confeccionada foi a Antena Discone Planar. As suas dimensões geométricas e sua impedância de entrada foram apresentadas na conclusão do capítulo anterior.

### 5.2. Técnica de Fabricação e Materiais Utilizados

Sabendo que a técnica de fabricação da Antena Discone Planar será a mesma realizada para confeccionar circuitos impressos, a confecção da antena iniciou-se pela busca de uma placa de material com permissividade igual ou semelhante a do FR4 simulado,  $\epsilon_r = 4,3$ .

Uma placa de fibra de vidro ( $\epsilon_r = 4,2$ ) de espessura igual a 1,6mm, em conformidade com a simulada, foi utilizada. Esta foi cortada de modo a ter 30cm x 30cm em suas dimensões.

Por ter uma geométrica tão simples a ser reproduzida, apenas baseada na hipotenusa e no ângulo central do triângulo e da largura e comprimento do retângulo, a antena foi desenhada manualmente sobre a placa.

Para a corrosão do metal não coberto foi utilizado o percloro de ferro.

### 5.3. Alimentação e Casamento de Impedância

A alimentação dos ‘braços’ da antena foi feita por meio de um cabo coaxial de  $50\Omega$ . Deste modo, visto que a impedância da antena é de  $200\Omega$ , se faz necessário o uso de um adaptador de impedância para que a antena possa transferir o máximo de energia.

O casamento de impedância é uma condição geralmente desejável num sistema eletrônico principalmente quando está operando em frequências e potências elevadas, quando o efeito da reflexão de sinal na carga pode prejudicar o bom funcionamento do sistema ou provocar danos no gerador de sinal [12].

O ajuste da resistência de carga é obtido com um transformador através da conhecida transformação de impedância:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2,$$

onde  $Z_1$  e  $Z_2$  são as impedâncias no primário e secundário e  $N_1$  e  $N_2$  são os números de espiras do primário e secundário, respectivamente.

No caso,  $Z_1$  será a impedância da antena de  $200\Omega$  e  $Z_2$  será a impedância do cabo de alimentação de  $50\Omega$ .

Deste modo, o casador de impedância deve ser um pequeno transformador composto de núcleo e relação de espiras de 2:1.

Depois de ser fabricado, este teve seus terminais do primário um conectado ao triângulo e outro ao retângulo e os terminais do secundário ligados a um conector no qual o cabo coaxial pode ser conectado.

#### 5.4. Conclusão

A confecção da Antena Discone Planar foi realizada com sucesso, sendo de muito fácil execução.

O protótipo físico da antena é mostrado na Figura 26.



Figura 26: Protótipo Físico da Antena Discone Planar Simulada.

## Capítulo VI – Medições e Análises

### 6.1. Introdução

Após a confecção do protótipo físico da Antena Discone Planar a próxima etapa foi a medição do parâmetro  $S_{1,1}$  e do diagrama de irradiação desta para futuras comparações com o protótipo simulável.

A medição do parâmetro  $S_{1,1}$  será feita com o auxílio de um analisador de rede.

Uma vez visto que o resultado da antenna condiz com o resultado simulado, a medição do diagrama de irradiação será realizada com o auxílio de uma antena de referência.

### 6.2. Resultados das Medições

O resultado obtido na medição do Parâmetro  $S_{1,1}$  da Antena Discone Planar fabricada é apresentado na Figura 27. Observa-se que esta obtém satisfatório desempenho na banda de frequências de 1,71 a 2,57 GHz, mas possui um nível altíssimo de perdas, não sendo nem ao menos considerada uma antena, na banda de operação para a qual foi projetada (100 a 1000 MHz).

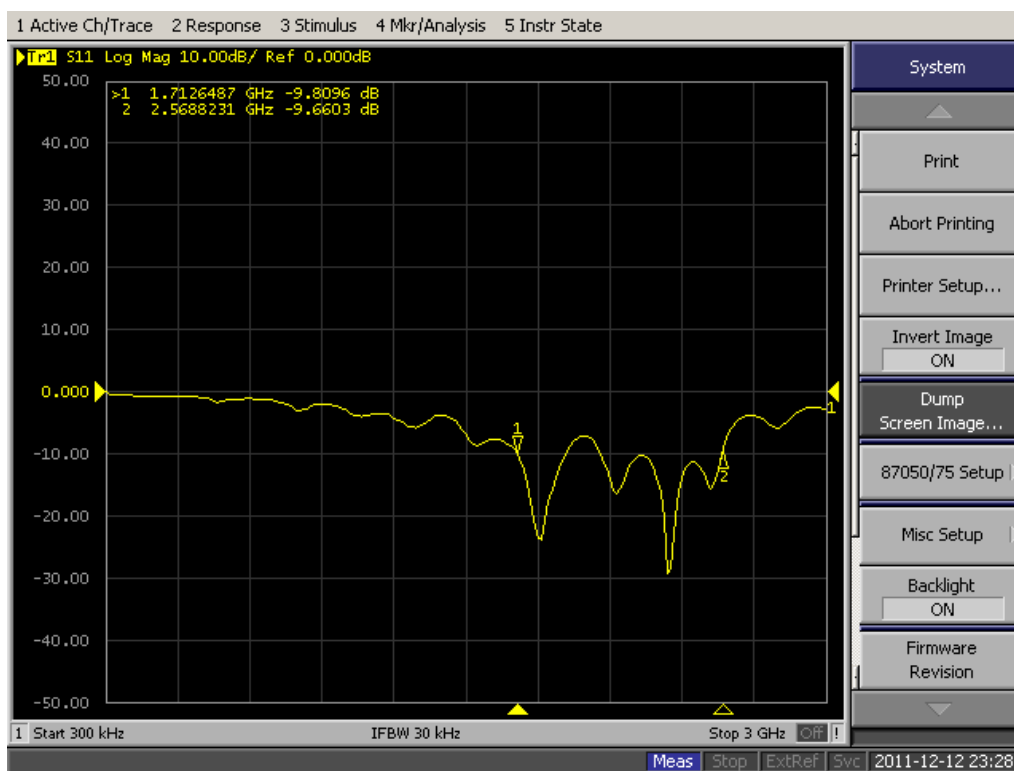


Figura 27: Resultado da Medição do Parâmetro  $S_{1,1}$  da Antena Discone Planar confeccionada.



### 6.3. Análise dos Resultados

A antena apresentou mau desempenho na banda de frequência para a qual foi projetada. O deslocamento da banda de operação pode ter ocorrido devido à não utilização do material FR4, no qual a antena foi simulada. O fato da banda de operação da antena não ser ultra larga pode ser consequência de algum problema físico com o adaptador de impedância.

Uma vez visto que o resultado da antena não foi condizente com o resultado simulado, a medição do diagrama de irradiação não foi realizada.

## Considerações Finais

O objetivo deste estágio foi o de conceber o projeto completo de uma antena de largura de banda ultra larga, na faixa de 100MHz a 1GHz, e de diagrama de irradiação omnidirecional.

Inicialmente, foi efetuado um estudo bibliográfico que permitiu melhor entendimento dos sistemas de antenas que permitem a obtenção das características desejadas. Durante esta etapa, escolheram-se as antenas independentes da frequência para serem simuladas.

Em seguida, as antenas apresentadas: Antena Bow-Tie, Antena Log-Periódica Planar, Antena Espiral e Antena Discone Planar, todas em formato planar, foram simuladas com o auxílio do *software* de simulações eletromagnéticas *Microwave-Studio CST®*, a fim de obter resultados a serem analisados posteriormente.

Logo, a partir da comparação dos resultados das simulações das antenas, a Antena Discone Planar foi escolhida para ser proposta para a confecção.

O projeto de confecção foi de simples e rápida realização, e logo foram realizadas as medições desta.

No resultado para o parâmetro  $S_{1,1}$  da antena física fabricada não foi possível encontrar resposta análoga à desejada, provavelmente a problemas com o uso de um material de permissividade diferente ao utilizado na simulação, e também com o casamento da impedância entre o cabo coaxial e a antena.

De modo geral, este trabalho de conclusão de curso foi realmente muito enriquecedor no que diz respeito à prática e aprofundamento do meu conhecimento na área de antenas antes obtidos teórico e praticamente durante a minha formação na UFCG e o meu estágio.

Este projeto também foi uma experiência tecnicamente enriquecedora, pois permitiu maior familiarização com o *software* de simulação de sistemas eletromagnéticos *CST*, com a técnica de circuito impresso para fabricação de antenas e com o analisador de rede.

Enfim, mesmo com a conclusão do trabalho sem boas respostas, a execução deste trabalho foi numa totalidade satisfatório para a aquisição de novos conhecimentos na área.

## Proposta de Continuação do Trabalho

Tornar uma antena bidirecional em uma omnidirecional, a partir da rotação da antena física em três estágios (ângulo 0, 60 e -60).

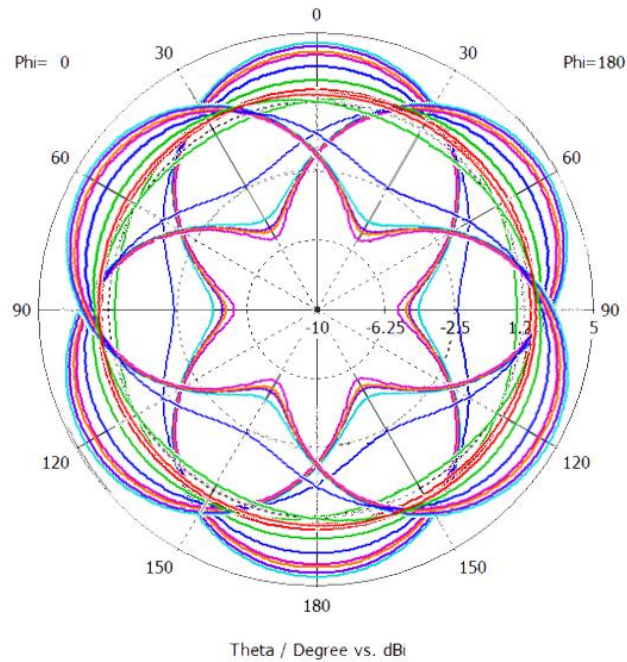


Figura 28: Possível modelo da omnidirecionalidade da antena bidirecional. Perdas menores que 1,6dB.

## Referências Bibliográficas

- [1] VELOSO, G. F. C.; “Localização de Descargas Parciais em Transformadores pela Análise da Emissão Acústica”. Tese (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, 2006.
- [2] KUPPUSWAMY, R.; “*On the UHF partial discharge measurement in transformers*”. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2003.
- [3] ZHENG, X; CAO, H.; TANG, J.; ZHANG, X; “*Application of sleeve monopole antenna for partial discharge detection in transformer*”. High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 2010.
- [4] BALANIS C.; “*Antenna Theory*” 3rd ed. John Wiley & Sons, 2005.
- [5] GHAVAMI, P. M.; MICHAEL, L. B.; KOHNO, R.; “*Ultra wideband signals and systems in communication engineering*” 2nd ed. John Wiley & Sons, 2007.
- [6] CASTRO, F.C.C.; FRANCO, P. R. G.; “Antenas”. PUCRS – Faculdade de Engenharia Elétrica – Departamento de Engenharia Elétrica.
- [7] RUMSEY, V. H.; “*Frequency Independent Antennas*”. IRE National Convention Record, pt.1, p. 114-118, 1957.
- [8] ORFANIDIS S. J., “*Electromagnetic Waves and Antennas*”. Rutgers University, 2004.
- [9] MISRA D. K.; “*Radio-Frequency and Microwave Communication Circuits: Analysis and Design*”. John Wiley & Sons, 2001.
- [10] SALONEN, P., SYDÄNHEIMO, L., KESKILAMMI, M., KIVIKOSKI, M.; “*A Small Planar Inverted-F Antenna for Wearable Applications*”. The Third International Symposium on Wearable Computers, Digest of Papers. pp. 95 – 100. 1999.

[11] DUHAMEL R. H., ISBELL D. E., “*Broadband Logarithmically Periodic Antenna Structures*” 1957, IRE National Convention Record, pt. 1, pp. 119–128.

[12] KRAUS, J. D.; “*Antennas*” 2nd ed. McGraw-Hill, 1988.

[13] GONZALEZ, F.J.; BOREMA, G.D.; “*Comparison of dipole, bowtie, spiral and log-periodic IR antennas*”. *Infrared Physics & Technology* 46, pp. 418–42, 2005.