

**Tiago Fadel de Camargo**

# **Estudo de antenas planares para aplicações em 2,4GHz**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Escola de Engenharia de  
São Carlos, da Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase  
em Eletrônica

ORIENTADOR: Murilo Araujo Romero

São Carlos

2008

## Resumo

Atualmente, um dos principais desafios na construção de dispositivos eletrônicos sem fio é desenvolver aparelhos com pequenas dimensões. Este requisito leva a necessidade de incorporar antenas que possam ser integradas no espaço disponível. No caso particular, de interesse aqui, a necessidade de reduzir significativamente as dimensões da antena utilizada no produto MOOVI, da NOXT tecnologia, motivou o estudo de antenas que operam na frequência de 2,4GHz, padrão para transmissão em curtas distâncias. O produto MOOVI é constituído de um transmissor de áudio portátil e um receptor que amplifica o sinal de áudio e transmite para os alto-falantes, a antena será incorporada no transmissor portátil. O objetivo do trabalho é encontrar uma antena planar que se adapte perfeitamente aos requisitos de projeto em relação às dimensões e desempenho

Para tal, em uma primeira etapa, os parâmetros e as propriedades a serem avaliados em uma antena serão discutidos. É utilizado um software, HFSS da Ansoft, para simular o comportamento eletromagnético das antenas e uma introdução a esta ferramenta é apresentada.

Para que o trabalho traga de fato um aprimoramento da antena empregada, é realizada uma apresentação da antena em uso atualmente no produto, um monopolo tipo L invertido, descrevendo suas características e os resultados experimentais obtidos em laboratório. Após a caracterização da antena atual, os objetivos desejados para o desempenho da próxima antena serão claramente descritos. Em seguida, discutimos as características e principais áreas de aplicação de antenas tipo monopolo, em L invertida, em F invertida e chip SMD.

Quanto às simulações propriamente ditas, inicialmente, uma antena impressa tipo F invertida disponibilizada pela Microchip no datasheet do módulo transceptor MRF24J40 é simulada no software e seus resultados são comparados com os dados fornecidos no datasheet para a validação do software. O software é utilizado para a obtenção de parâmetros não fornecidos junto à geometria da antena nos documentos disponíveis. Em seguida, uma geometria de antena F invertida disponibilizada pela Chipcon em sua nota de aplicação AN043 é simulada e analisada. Finalmente, as características das antenas chip SMD dos fabricantes Antenna Factor e Yageo são apresentados.

Os resultados das quatro antenas planares são então comparados com os resultados da antena utilizada atualmente no produto MOOVI. Após a comparação dos resultados, a antena que melhor atendeu aos requisitos do projeto foi a antena disponibilizada pela Chipcon. A grande vantagem desta antena é conseguir um bom desempenho, ocupando pequenas dimensões, sem acrescentar custo adicional no produto.

**Palavras-chave:** Antena impressa, Antena chip SMD, Antena de 2,4GHz,



## **Abstract**

Nowadays, one of the main challenges on electronics wireless devices fabrication is to develop components with small dimensions. This requirement leads to the need of integrating the antennas on the available space. In the particular case of interest here, the need to significantly reduce the dimensions of the antenna used on MOOVI product of NOXT Tecnologia, has motivated the study on antennas working at the 2.4GHz frequency, custom for short ranges transmissions. MOOVI product is composed by a portable audio transmitter and a receiver that amplifies the audio signal and transmit it to the speakers, the antenna will be integrated in the transmitter. This work goal is to find a planar antenna wich perfectly matches the design requirement concerning dimensions and performance.

With this goal in mind, as a first step, antennas parameters and properties of interest presented. The Ansoft HFSS software is used to simulate the antennas eletromagnetic performance and a brief introduction to this simulation tool is given.

Next, we present the antenna currently used, a L inverted monopole, describing its features and its experimental results obtained in laboratory. After the antenna characterization, the desired performance goals for the next-generation will be clearly described. In sequence, features and main application areas for monopole, inverted in L, inverted F, and SMD chip geometries are discussed.

Regarding the simulation themselves, first, a printed inverted F antenna type available by Microchip in the MRF24J40 transceptor module datasheet is simulated . The obtained results then compared to the data provided in the datasheet, as a software validation. The software also is used to obtain parameters not furnished by the manufacturer. Next, an inverted F antenna geometry available at the AN043 Chipcon application note is simulated and analyzed. Finally, the main features from SMD chip antennas from Antenna Factor and Yageo manufacturers are presented.

The results from these four planar antennas are then compared with the performance of the antenna currently used in the MOOVI product. The antenna which best meets the design requeriments was the antenna produced by Chipcon. The main advantage of this antenna is to provide a good performance, assuring small dimensions, without increasing product price.

**Key-words: Printed Antenna, SMD Chip Antenna, 2,4GHz Antenna,**

## Lista de figuras

Figura 2.1.1 – Componentes de campo elétrico distante[9].....	4
Figura 2.1.2 – Plano $uv$ mostrado na figura II.1.....	4
Figura 2.1.3 – Tipos de polarização.....	5
Figura 2.2.1 – Diagrama de radiação tridimensional [9].....	6
Figura 2.2.2 – Diagrama vertical e diagrama horizontal de radiação [7].....	7
Figura 2.2.3 – Diagrama de radiação na forma polar [9] .....	7
Figura 2.2.4 – Diagrama de radiação na forma retangular[9].....	8
Figura 2.3.1 – Diagrama de radiação retangular de uma antena parabólica. O ângulo na abscissa do gráfico é o ângulo plano contido no plano H e é medido em relação ao eixo do refletor parabólico [10].....	9
Figura 2.4.1 – Aproximação do ângulo sólido pelo ângulo de meia potência [10].....	12
Figura 2.5.1 – A antena é uma região de transição entre uma onda guiada numa linha de transmissão e uma onda no espaço-livre [1].....	14
Figura 2.5.2 – Linha de transmissão genérica [7].....	14
Figura 2.5.3 – Circuito equivalente para um trecho elementar da linha de transmissão [7].....	15
Figura 2.5.4 – Onda incidente e onda refletida [7].....	16
Figura 2.5.5 – Antena Dipolo alimentada por uma linha de transmissão de impedância característica $Z_0$ . A impedância da carga $Z_c$ da linha de transmissão é a impedância $Z_A$ “vista” nos terminais de $A$ e $A'$ da antena [12].....	17
Figura 2.6.1– Quadripolo linear [4].....	18
Figura 2.6.2– Representação do parâmetro $S$ [4].....	18
Figura 4.1.1– Antena monopolo vertical [7].....	29
Figura 4.1.2 – Antena monopolo sob o efeito do método das imagens [7].....	29
Figura 4.1.3 – Diagramas de Radiação para uma antena tipo monopolo [7].....	30
Figura 4.2.1- Antena em L invertida [5].....	30
Figura 4.3.1 - Antena em F invertida [5].....	31
Figura 4.3.2 - Antena em F impressa [5].....	31
Figura 5.1.1 - Geometria da antena utilizada no produto.....	33
Figura 5.1.2 – Parte da PCB em que a antena foi inserida.....	34
Figura 5.1.3 - Posição da Bateria no produto.....	34
Figura 5.1.4 – Variação da impedância da antena atual sem o casamento de impedância.....	35
Figura 5.1.5 – Variação da impedância da antena atual após o casamento de impedância.....	36
Figura 5.1.6 – VSWR medido para antena atual.....	37
Figura 5.1.7 – Diagrama de radiação polar vertical da antena atual.....	38
Figura 5.1.8 – Diagrama de radiação polar horizontal da antena atual.....	39

Figura 6.1.1 – Antena Microchip e suas dimensões em milímetros [13].....	41
Figura 6.1.2 – Plano da PCB superior e inferior da antena Microchip [13].....	42
Figura 6.1.3 – Como foi modelado a antena Microchip no software.....	42
Figura 6.1.4 – Detalhe do bloco de ar com a antena Microchip inserida.....	43
Figura 6.1.5 - Parâmetro $S_{11}$ da antena Microchip fornecido pelo fabricante [13].....	43
Figura 6.1.6 – Parâmetro $S_{11}$ da antena Microchip simulado no HFSS.....	44
Figura 6.1.7 – Variação do parâmetro de espalhamento $S_{11}$ fornecida pela Microchip, representado por meio da Carta de Smith.....	45
Figura 6.1.8- Variação do parâmetro de espalhamento $S_{11}$ simulado, representado por meio da Carta de Smith.....	45
Figura 6.1.9 – Gráfico do VSWR fornecido pela Microchip [13].....	46
Figura 6.1.10 – Gráfico do VSWR simulado da antena Microchip.....	46
Figura 6.1.11 – Variação da impedância da antena fornecido pela Microchip.....	47
Figura 6.1.12– Variação da impedância da antena simulada Microchip.....	48
Figura 6.1.13 – Diagrama de radiação 3D simulado da antena Microchip.....	48
Figura 6.1.14 – Diagrama de radiação 2D simulado da antena Microchip, em vermelho o diagrama horizontal e em roxo o diagrama vertical.....	49
Figura 6.2.1- Antena Chipcon inserida em uma PCB [14].....	50
Figura 6.2.2 – Dimensões da Antena da Chipcon [14].....	50
Figura 6.2.3 – Detalhe da simulação Chipcon, PCB inserida em ambiente de ar onde é aplicado a radiação (a) e detalhe da excitação (rosa) e o local em que a antena é ligada ao terra.....	51
Figura 6.2.4- Variação da impedância da antena Chipcon simulado, mostrado na forma retangular.....	51
Figura 6.2.5 – Gráfico do VSWR simulado Chipcon.....	52
Figura 6.2.6 – Diagrama de radiação horizontal disponibilizado na nota Chipcon.....	53
Figura 6.2.7 – Diagrama de radiação horizontal simulado para antena Chipcon.....	53
Figura 6.2.8 – Diagrama de radiação vertical fornecido na nota Chipcon.....	54
Figura 6.2.9 - Diagrama de radiação vertical simulado para antena Chipcon.....	54
Figura 6.2.10 - Diagramas de radiação 3D Chipcon.....	55
Figura 6.3.1- Dimensões, antena chip – Antenna Factor.....	56
Figura 6.3.2 – VSWR, antena chip - Antenna Factor.....	56
Figura 6.3.3 – Diagrama de radiação vertical – Antenna Factor.....	57
Figura 6.3.4- Diagrama de radiação horizontal – Antenna Factor.....	57
Figura 6.4.1 – Dimensões de PCB sugerida pela Yageo.....	59
Figura 6.4.2 – VSWR e impedância da antena chip da marca Yageo.....	60
Figura 6.4.3 – Diagramas de radiação Vertical e Horizontal da antena da Yageo.....	61

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Caracterização da antena atual do produto.....	39
Tabela 2 – Requisitos para nova antena.....	40
Tabela 3 – Caracterização da antena da Microchip.....	49
Tabela 4 – Caracterização da antena disponibilizada pela Chipcon na nota AN043.....	55
Tabela 5 – Caracterização da Antena chip SMD da marca Antenna Factor.....	58
Tabela 6 – Caracterização da Antena chip SMD da marca Yageo.....	61
Tabela 7 - Comparação entre os resultados obtidos.....	62

## Lista de símbolos

$\vec{E}$	Vetor campo Elétrico
$\vec{H}$	Vetor campo Magnético
BW	Beam Width ( largura de feixe)
R	Valor de resistência
L	Valor de indutância
C	Valor de capacitância
$\theta$	Vetor unitário do eixo cartesiano
$\varphi$	Vetor unitário do eixo cartesiano
PCB	Printed Circuit Board (Placa de Circuito Impresso)
$S(\theta_0, \varphi_0)$	Densidade de potência irradiada em determinada direção
$S_m$	Densidade média de potência irradiada
G	Ganho de Potência
U	Intensidade de radiação
$\eta$	Rendimento
$P_A$	Potência de alimentação
$P_r$	Potência irradiada
V	Valor para tensão
I	Valor para corrente
Y	Valor para admitância
$Z_0$	Impedância característica da linha
$Z_c$	Impedância da carga
$\Delta x$	Comprimento da linha
ROE	Relação de Onda estacionária
$\Gamma$	Coefficiente de reflexão
$\lambda$	Comprimento de onda
$\lambda_g$	Comprimento de onda guiado
$\beta$	Número de onda
FEM	Finite Element Method ( Método dos Elementos Finitos)
EIRP Power)	Potencia Isotrópica Irradiada Equivalente (Equivalent isotropically radiated Power)
IFA	Inverted F Antenna (Antena em F invertida)
SMD	Surface Mounted Device (Dispositivo montado em superfície)

## Sumário

1-Introdução.....	1
2-Parâmetros e Propriedades fundamentais de uma Antena.....	3
2.1-Polarização do Campo Eletromagnético .....	3
2.2-Diagrama de Radiação.....	6
2.3-Largura de Feixe e Lóbulos Laterais.....	9
2.4-Diretividade e Ganho.....	10
2.5-Impedância de Entrada.....	13
2.6-Parâmetros S (Parâmetros de espalhamento).....	18
2.7-Largura de Banda.....	21
3-Software Utilizado – HFSS .....	22
3.1-Geração do Modelo Paramétrico.....	24
3.1.1- Criação da Geometria.....	24
3.1.2- Condições de Contorno.....	24
3.1.3 – Excitações.....	27
4 – Particularidades do sistema e tipos de antenas propostas.....	28
4.1- Antenas Monopolo .....	29
4.2- Antenas em L invertida.....	30
4.3- Antenas em F invertida.....	31
4.4 – Antenas chip.....	32
5 – Características da antena atualmente empregada e requisitos para a nova antena.....	33
5.1- Características da antena atual.....	33
5.2 – Requisitos para a próxima antena.....	40
6- Modelos de antenas avaliados.....	41
6.1 – Microchip.....	41
6.2 – Chipcon Products.....	50
6.3 – Antenna Factor.....	56
6.4 – Yageo.....	59
7-Escolha da Antena.....	62
8-Conclusão.....	63
9-Referências Bibliográficas.....	64

## 1- Introdução

A NOXT tecnologia é uma empresa fundada por ex-alunos da Escola de Engenharia de São Carlos, e tem como objetivo desenvolver produtos com a tecnologia *wireless*. Atualmente a empresa possui um produto no mercado, o MOOVI. Este produto integra qualquer dispositivo que tenha uma saída de áudio com o som automotivo e é constituído por um transmissor, responsável pela digitalização, codificação e transmissão do áudio, e uma central que envia o sinal de áudio para os alto falantes do veículo após decodificar, converter e amplificar o sinal.

A análise do atrativo mercado de aparelhos reprodutores de áudio e conseqüentemente a percepção do domínio da marca Apple, tanto tecnológica quanto comercialmente, levou a empresa a iniciar o desenvolvimento de um novo produto dedicado especialmente a dispositivos desta marca. Os aparelhos desenvolvidos pela Apple têm como características básicas, dimensões reduzidas e interface própria, diferente das demais marcas.

Para o desenvolvimento de um novo produto, exclusivo para dispositivos da marca citada, foi necessário o aperfeiçoamento do produto MOOVI para atender as exigências de interface e estética dos usuários da Apple.

O novo desafio encontrado na empresa trouxe a possibilidade de um estudo a fim de conseguir atingir os objetivos em questão. O foco é reduzir significativamente o tamanho do produto e, se possível, aumentar sua eficiência. Um aumento de eficiência em um produto *wireless* é caracterizado por melhorias nas características de transmissão.

A antena empregada no produto MOOVI é uma antena impressa e por isso não possui nenhum custo adicional e atende as necessidades impostas de maneira satisfatória. As antenas impressas apresentam características que as tornam particularmente adequadas para dispositivos móveis. Suas dimensões reduzidas e a grande versatilidade no comportamento elétrico (largura de banda, diagrama de radiação, polarização), tornaram este tipo de antenas um sucesso em muitas aplicações comerciais.

A produção de uma série de modelos de antenas e posteriormente a análise em laboratório, para determinação da mais adequada, não é um método interessante de ser aplicado, dado o custo financeiro e mão-de-obra envolvidos. Como alternativa, a grande evolução do processamento de modelos matemáticos em computadores possibilitou a produção de softwares que simulam os efeitos do eletromagnetismo em estruturas radiantes. As estruturas que são produzidas de forma a irradiar as ondas eletromagnéticas são antenas, e com a utilização de algum destes softwares é possível o projeto preciso destas estruturas.

Um dos softwares mais confiáveis entre as pessoas que estudam eletromagnetismo é o HFSS da Ansoft, que será nossa ferramenta de trabalho para escolher a antena que melhor atenda aos requisitos deste projeto.

Em uma etapa inicial será necessária uma introdução sobre os parâmetros geralmente analisados para caracterizar uma antena. Definidos os parâmetros fundamentais para analisar uma antena, o trabalho descreverá o software abordando suas características, aplicações e as necessidades para utilizá-lo de maneira correta e eficiente.

As particularidades do sistema em que a antena será empregada serão apresentadas. Antenas tipo monopolo, em L invertido, em F invertido e antenas chip SMD, mais indicados para serem utilizados, bem como suas características e principais áreas de aplicações também serão expostas.

Para que o trabalho traga de fato um aprimoramento da antena empregada, será necessária uma apresentação da antena atual, um monopolo tipo L invertido, descrevendo suas características e os resultados experimentais obtidos em laboratório. Após a caracterização da antena atual, os objetivos desejados para o desempenho da próxima antena serão claramente descritos.

Para tal, alguns modelos de antenas impressas tipo F invertido (IFA), propostos por fabricantes de módulos transceptores, serão apresentados. Os fabricantes de módulos transceptores disponibilizam dados sobre as antenas nos documentos fornecidos, o que servirá de base para validar as simulações. Feita a validação é possível a obtenção de dados não fornecidos nos documentos. De outro lado, as antenas chip SMD, pelo fato de sua geometria não ser disponibilizada, não foram simuladas. Os dados utilizados para a caracterização deste tipo de antenas são os fornecidos pelos fabricantes. Comparando os resultados dos diferentes tipos analisados será possível escolher o melhor caminho a seguir.



## **2- Parâmetros e Propriedades fundamentais de uma Antena**

Uma antena pode ser definida como uma estrutura associada com a região de transição entre uma onda guiada e uma onda no espaço livre, ou vice-versa [1].

O desenvolvimento matemático dos campos eletromagnéticos, irradiados a partir de um volume contendo fontes, oferece a possibilidade da definição das características da estrutura irradiante [2].

Para a análise do desempenho de uma antena é necessário primeiramente definir os principais parâmetros e as propriedades fundamentais de uma antena. Assim este capítulo definirá:

- 1- Polarização do Campo Eletromagnético
- 2- Diagrama de radiação
- 3- Largura de feixe e lóbulos laterais
- 4- Diretividade e Ganho
- 5- Impedância de Entrada
- 6- Parâmetro de Espalhamento
- 7- Largura de Banda

As definições e fórmulas relatadas neste capítulo, bem como a notação utilizada foram extraídas das referencias bibliográficas [1] e [2]. O item 2.6 seguiu as referências bibliográficas [3] e [4].

### **2.1- Polarização do Campo Eletromagnético**

Uma característica importante na aplicação de antenas é o conceito de polarização do campo elétrico que é irradiado pela antena. Em uma onda eletromagnética as distribuições dos campos elétricos e magnéticos variam ao longo do tempo. O campo elétrico total da onda irradiada é composto por componentes ortogonais, que diferem em amplitudes e fases. A orientação do vetor campo elétrico determina a polarização que pode ser linear, circular ou elíptica ( Figura 2.1.1).

Utilizando a geometria e notação da figura 2.1.1, o vetor campo elétrico é dado pela equação II.1.

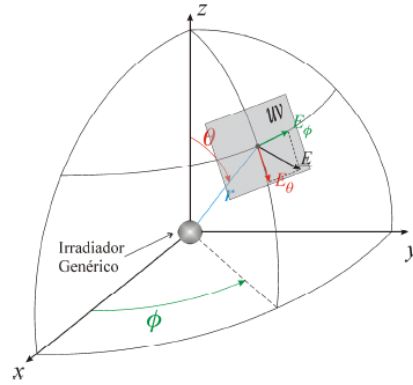


Figura 2.1.1 – Componentes de campo elétrico distante[9].

$$\vec{E} = \overline{E_\theta} E_{\theta máx} \cos(\omega t) + \overline{E_\phi} E_{\phi máx} \cos(\omega t + \alpha) \quad \text{II.1}$$

Onde  $E_\theta$  e  $E_\phi$  são as amplitudes, definidas ao longo dos eixos cartesianos dos vetores unitários  $\theta$  e  $\phi$ , e  $\alpha$  é a defasagem no tempo entre estas componentes. A equação II.1 pode ser escrita assumindo:

$$u = E_{\theta máx} \cos(\omega t) \quad \text{II.2}$$

$$v = E_{\phi máx} \cos(\omega t + \alpha) \quad \text{II.3}$$

A figura 2.1.2 mostra o plano  $uv$  onde o centro da elipse é o centro do plano e o eixo maior inclinado em relação ao eixo  $u$  do ângulo  $\tau$ , dado pela equação II.5.

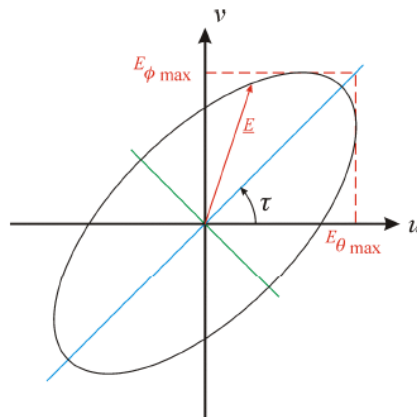


Figura 2.1.2 – Plano  $uv$  mostrado na figura 2.1.1.

$$\tau = \frac{1}{2} \arctan \left( \frac{2E_{\theta \max} E_{\phi \max} \cos(\alpha)}{E_{\theta \max}^2 - E_{\phi \max}^2} \right)$$

II.5

A polarização linear e circular são casos especiais da polarização elíptica. Quando as duas componentes do campo elétrico radiado estão oscilando em fase no tempo ( $\alpha = 0$ ), ou em oposição de fase ( $\alpha = \pi$ ) a polarização é linear. Para este caso é comum associar-se a orientação da antena em relação ao solo. Se as duas componentes ortogonais têm a mesma amplitude e estão defasadas de  $90^\circ$ , isto é, oscilam em quadratura de fase no tempo ( $\alpha = \pi/2$ ), a situação é de polarização circular. Para todos os outros casos a polarização é elíptica [1]. A figura 2.1.3 mostra os 3 tipos de polarização descritos.

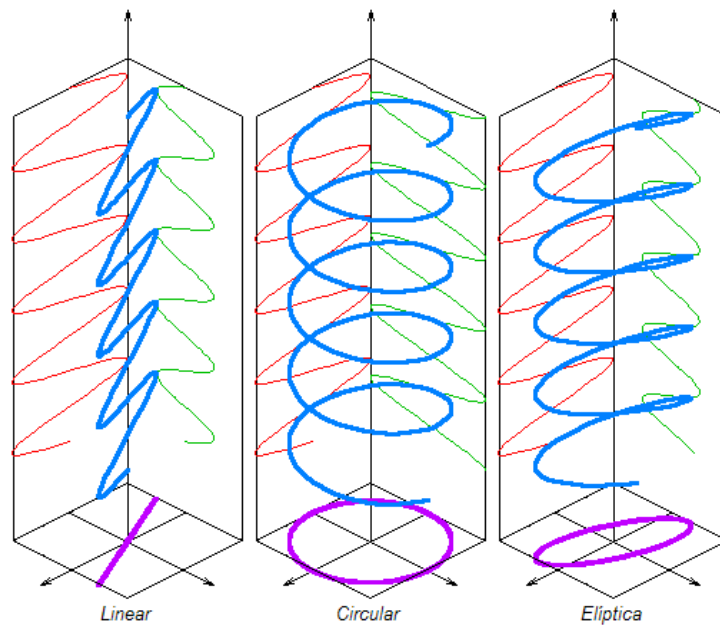


Figura 2.1.3 – Tipos de polarização.

Para o caso de polarização linear, ao se posicionar uma antena de modo a transmitir (ou receber) certa informação, este posicionamento deve levar em consideração o posicionamento da antena no terminal oposto. Assim, se determinada transmissão ocorre segundo polarização linear vertical, a recepção também deverá ocorrer segundo uma antena capaz de suportar uma polarização linear vertical [2].

## 2.2 - Diagramas de Radiação

Uma estrutura irradiante apresenta direções segundo as quais para uma mesma potência total irradiada é possível registrar diferentes intensidades de campo elétrico,  $\bar{E}$ , a uma distância  $r$ . Com o aumento da distância, a intensidade de campo elétrico diminui [2].

$$|\bar{E}| = \frac{E_0}{r} f(\theta, \phi) \quad \text{II.6}$$

Para uma mesma esfera  $r$  ao redor de uma fonte isotrópica, a função  $f(\theta, \phi)$  é responsável pela “forma” da distribuição do campo sobre esta esfera, chamando-se esta função de “diagrama de irradiação” ou “diagrama de um campo distante[1]”. Variando o raio  $r$ , pode-se notar que o campo elétrico terá sempre a mesma forma, isto é, ao tomar  $r$  que satisfaça à condição de zona de irradiação, os diagramas de radiação independem da distância a fonte, sempre tendo a mesma forma[2].

Associa-se a direção de máxima radiação o valor unitário, isto é, as outras direções estão normalizadas em relação a esta e com isto o diagrama de radiação será considerado pela função:

$$F(\theta, \phi) = \alpha f(\theta, \phi) \quad \text{II.7}$$

Em que,

$$F(\theta, \phi)_{\text{máximo}} = 1 \quad \text{II.8}$$

O diagrama de radiação será uma representação gráfica desta “forma” da distribuição do campo elétrico. Como esta forma varia no plano tridimensional, a representação mais fiel é obtida por meio do diagrama da figura 2.2.1, porém, como geralmente este diagrama tridimensional é difícil de ser produzido, usualmente este diagrama é calculado, medido e gravado em uma série de diagramas bidimensionais em planos ortogonais.

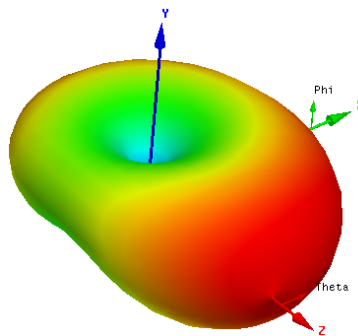


Figura 2.2.1 – Diagrama de radiação tridimensional [9].

Em particular, os gráficos das funções  $F(\pi/2, \phi)$  e  $F(0, \pi/2)$  serão denominados, respectivamente, diagrama horizontal e diagrama vertical de radiação (Figura 2.2.2). Os diagramas bidimensionais podem ser representados na forma polar (Figura 2.2.3) ou na forma retangular (Figura 2.2.4).

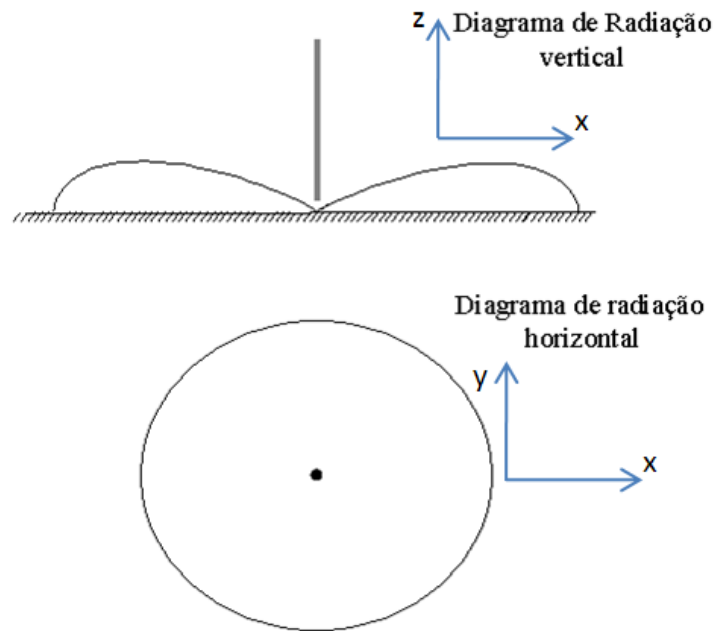


Figura 2.2.2 – Diagrama vertical e diagrama horizontal de radiação [7].

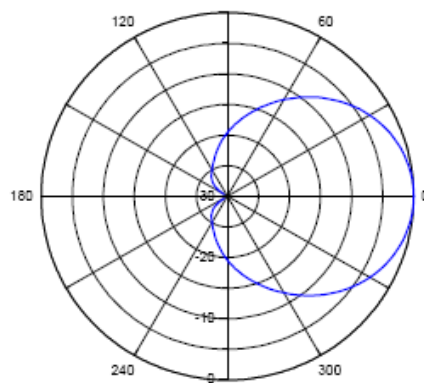


Figura 2.2.3 – Diagrama de radiação na forma polar [9].

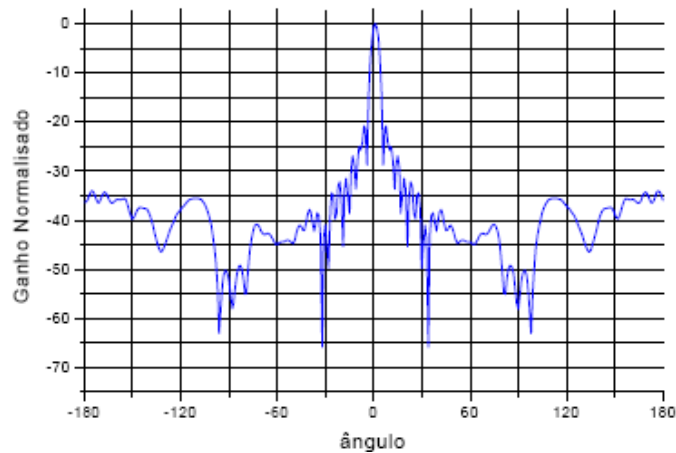


Figura 2.2.4 – Diagrama de radiação na forma retangular [9].

Os diagramas nos planos vertical e horizontal necessitam entretanto ser associados à polarização da antena para os casos de polarização linear. Desta forma, se uma antena irradia segundo polarização vertical, o diagrama vertical de radiação corresponderá ao diagrama gravado sobre o plano que contém o vetor campo elétrico e, por isso mesmo, designado de “diagrama em plano E”; em consequência, para este caso, o diagrama horizontal de radiação é, analogamente, designado por “diagrama em plano H”, uma vez que, em campo distante, os vetores campo elétrico e campo magnético são mutuamente ortogonais. Por outro lado, se uma antena irradia segundo polarização horizontal, o seu diagrama horizontal estará representado pelo diagrama em plano E, enquanto que o diagrama vertical de radiação estará representado pelo diagrama em plano H [2].

Assim, é imediato que, na prática, ao se estudar o diagrama de radiação de uma antena isolada, a referência deverá ser feita em termos de “diagrama em plano E” ou “diagrama em plano H” e somente quando ela for aplicada a um sistema de comunicações a associação com aquele que representará o diagrama vertical e o que representará o diagrama horizontal [2].

Os diagramas de radiação são de grande importância, pois com uma rápida análise é possível escolher a antena que melhor atende as necessidades do sistema.

## 2.3- Largura de Feixe e Lóbulos Laterais

Em um diagrama de radiação é possível identificar a presença de uma região de maiores intensidades, essa região é chamada de “lóculo principal”, em consequência as demais regiões onde ocorrem picos de intensidade menores são chamadas de “lóbulos secundários” ou “laterais” como mostra a figura 2.3.1.

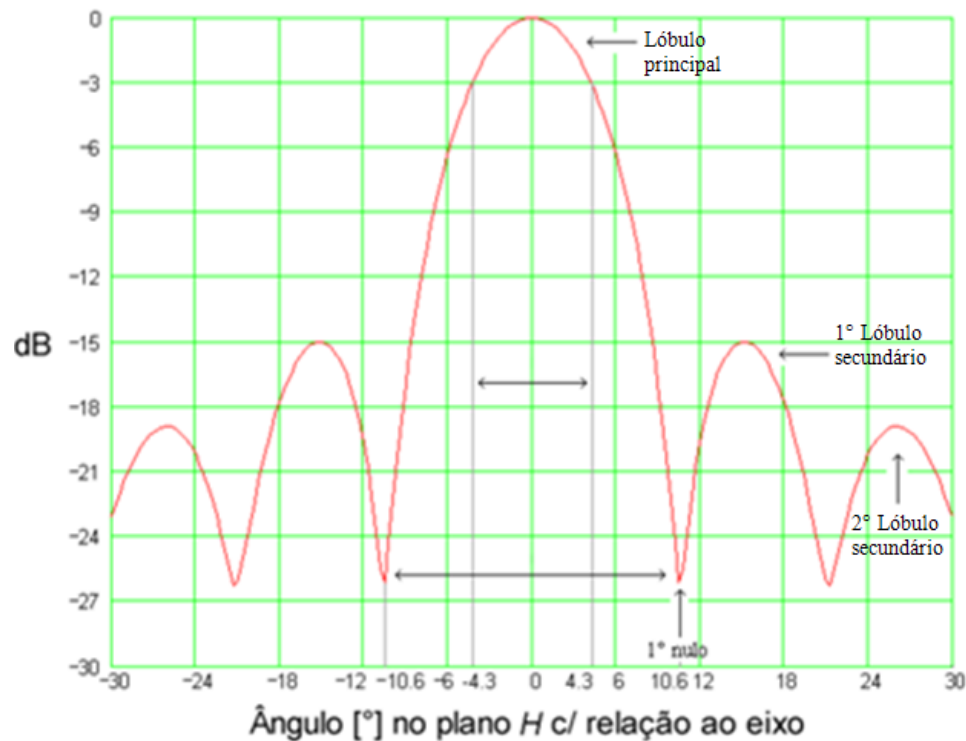


Figura 2.3.1 – Diagrama de radiação retangular de uma antena parabólica. O ângulo na abscissa do gráfico é o ângulo plano contido no plano H e é medido em relação ao eixo do refletor parabólico [8].

A partir dos diagramas de radiação, é possível caracterizar a direção segundo a qual a potência transmitida (ou recebida) é metade daquela registrada para a direção principal. Sendo as estruturas simétricas, este ângulo e seu simétrico caracterizarão a “largura de feixe” entre pontos de 3dB. A largura de feixe pode ser caracterizada também entre pontos onde a potência associada está um décimo, um centésimo ou até mesmo seu valor mínimo. A figura 2.3.1 apresenta marcações para pontos de 3dB e valor mínimo.

Na figura 2.3.1 a largura de feixe para meia potência é de  $8.6^\circ$  e a largura de feixe para seu valor mínimo é de  $21.2^\circ$ .

## 2.4- Diretividade e Ganho

A capacidade de uma antena em concentrar a potência irradiada em uma dada direção, ou absorver a potência incidente a partir daquela direção, é definida como “diretividade da antena segundo determinada direção” [2]. Em outras palavras, a diretividade indica até que ponto a antena é capaz de concentrar a potência irradiada na direção de máxima irradiação, ou concentrar a absorção de potência incidente na direção de máxima absorção para o caso de antenas receptoras.

Quantitativamente, define-se diretividade como a razão entre a densidade de potência irradiada ( $S(\theta_0, \phi_0)$ ), em determinada direção, e a densidade média de potência irradiada ( $S_m$ ). Para uma fonte isotrópica isto é:

$$D(\theta_0, \phi_0) = \frac{S(\theta_0, \phi_0)}{S_m} = \frac{S(\theta_0, \phi_0)}{P_r/4\pi r^2} \quad \text{II.9}$$

Para um sistema de coordenadas esféricas, a potência irradiada  $P_r$ , na equação (II.9), é dada por:

$$P_r = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} S(\theta, \phi) r^2 \sin\theta \, d\theta \, d\phi \quad \text{II.10}$$

A equação II.9 pode ser reescrita.

$$D(\theta_0, \phi_0) = \frac{r^2 S(\theta_0, \phi_0)}{\frac{1}{4\pi} \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} S(\theta, \phi) r^2 \sin\theta \, d\theta \, d\phi} \quad \text{II.11}$$

Identificando-se  $r^2 S(\theta, \phi)$  como potência irradiada por unidade de ângulo sólido ( $P_r/4\pi$ ), esta intensidade de radiação permite escrever:

$$U(\theta, \phi) = r^2 S(\theta, \phi) \quad \text{II.12}$$

$$D(\theta_0, \phi_0) = \frac{4\pi U(\theta_0, \phi_0)}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U(\theta, \phi) d\Omega} \quad \text{II.13}$$

em que o elemento de ângulo sólido é:

$$d\Omega = \sin\theta \, d\theta \, d\phi \quad \text{II.14}$$



A diretividade refere-se sempre ao valor máximo que a função diretividade pode assumir, assim para determinar a diretividade é necessário que esta “direção de interesse” seja a direção onde a densidade de potência é máxima,  $S(\theta_m, \phi_m)$ , isto é:

$$D_{\max} = \frac{S(\theta_m, \phi_m)}{\frac{1}{4\pi r^2} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi S(\theta, \phi) r^2 \sin\theta \, d\theta \, d\phi} \quad \text{II.15}$$

ou ainda, através da intensidade de radiação  $U$ :

$$D_{\max} = \frac{4\pi U(\theta_m, \phi_m)}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi U(\theta, \phi) \, d\Omega} \quad \text{II.16}$$

Se é possível concentrar grandes quantidades de potência por unidade de ângulo sólido (valor alto para  $U(\theta_m, \phi_m)$ ), esta situação caracteriza estruturas irradiantes de alta diretividade. Isto é, definindo-se

$$B = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi U(\theta, \phi) \, d\Omega}{U(\theta_m, \phi_m)} \quad \text{II.17}$$

e sendo a diretividade uma grandeza adimensional, esta grandeza  $B$  representa o ângulo sólido através do qual toda a potência irradiada fluiria caso a intensidade de radiação fosse constante e igual a seu valor máximo. Para as antenas de grande intensidade de radiação, então,  $B$  é pequeno e

$$D_{\max} = \frac{4\pi}{B} \quad \text{II.18}$$

Sendo a diretividade uma grandeza adimensional, esta grandeza  $B$  representa o ângulo sólido através do qual toda a potência irradiada fluiria caso a intensidade de radiação fosse constante e igual o seu valor máximo. O cálculo da diretividade geralmente é feito de forma simplificada aproximando este ângulo sólido  $B$  pelo produto das larguras de feixes de 3dB relativos a dois planos ortogonais, cuja intersecção naturalmente é a direção de máxima radiação, conforme a figura 2.4.1.

Assim, escreve-se:

$$B = BW\theta \cdot BW\phi \quad \text{II.19}$$

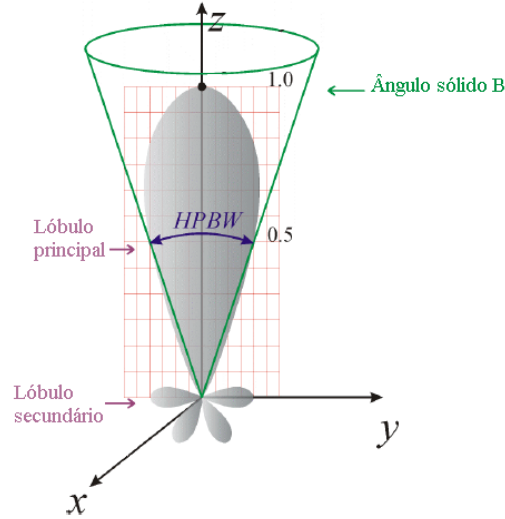


Figura 2.4.1 – Aproximação do ângulo sólido pelo ângulo de meia potência [8].

Manipulando as equações II.18 e II.19:

$$D_{\max} = \frac{4\pi}{BW\theta \cdot BW\phi} \quad \text{II.20}$$

Para estimar o desempenho da antena no sistema, isto é, quando se deseja exprimir o desempenho da antena segundo a potência com que esta é alimentada ( $P_A$ ), a grandeza comumente usada é o “ganho de potência”, ou ganho da antena definido como:

$$G(\theta_0, \phi_0) = \frac{S(\theta_0, \phi_0)}{P_A/4\pi r^2} \quad \text{II.21}$$

Com isso, define-se um rendimento associado à antena, dado por

$$\eta = \frac{P_r}{P_A} \quad \text{II.22}$$

representando a fração da potência, com que se alimenta a antena, que é efetivamente irradiada ( $P_r$ ). Da equação II.9 obtém-se então uma relação importante entre diretividade e ganho, expressa com o auxílio da equação II.21 por:

Na prática, para antenas com  $\eta = 1$ , as duas grandezas (diretividade e ganho) serão confundidas, usando-se exclusivamente, a expressão “ganho da antena”.

## 2.5- Impedância de Entrada

Em conexão com a definição de antena, relatada no início deste capítulo, antes de apresentar o conceito de impedância de entrada de uma antena é necessário definir linhas de transmissão e ressoador. Uma linha de transmissão é um dispositivo para transmitir ou guiar energia de radiofrequência de um ponto a outro. Comumente é desejável transmitir a energia com um mínimo de atenuação, sendo as perdas tão pequenas quanto possíveis [1].

Um gerador conectado a uma linha de transmissão sem perdas produz uma onda progressiva uniforme ao longo da linha. Se a linha for curto-circuitada, aparece uma onda estacionária devida à interferência das ondas incidente e refletida. Ao longo de uma onda estacionária é possível observar máximos e mínimos da onda. Se a onda refletida for igual à onda incidente, temos uma onda estacionária pura. A energia ao longo da onda oscila de totalmente elétrica a totalmente magnética, duas vezes por ciclo. Tal comportamento da energia é característico de um circuito ressonante ou ressoador. Embora o termo ressoador, no seu sentido mais geral, possa ser aplicado a qualquer dispositivo com ondas estacionárias, é comumente reservado para dispositivos com concentrações de energia armazenadas grandes comparadas com os fluxos de entrada e de saída de energia [1].

Como ilustração destas definições, considere a figura 2.5.1. Um gerador ou transmissor é conectado a uma linha de transmissão de dois fios  $AB$ . Admitindo que a linha esteja adaptada apropriadamente, ela leva uma onda progressiva para fora e se comporta como uma linha de transmissão pura. Em  $A$  há uma seção de linha curto-circuitada conectada em paralelo. Esta linha tem uma onda estacionária e age como um ressoador ou linha ressonante. Além de  $B$  a linha de transmissão se dilata gradualmente até que a separação entre os condutores seja de muitos comprimentos de onda. Nesta região a onda guiada pela linha de transmissão é irradiada numa onda no espaço-livre. Esta região da linha age como uma antena.

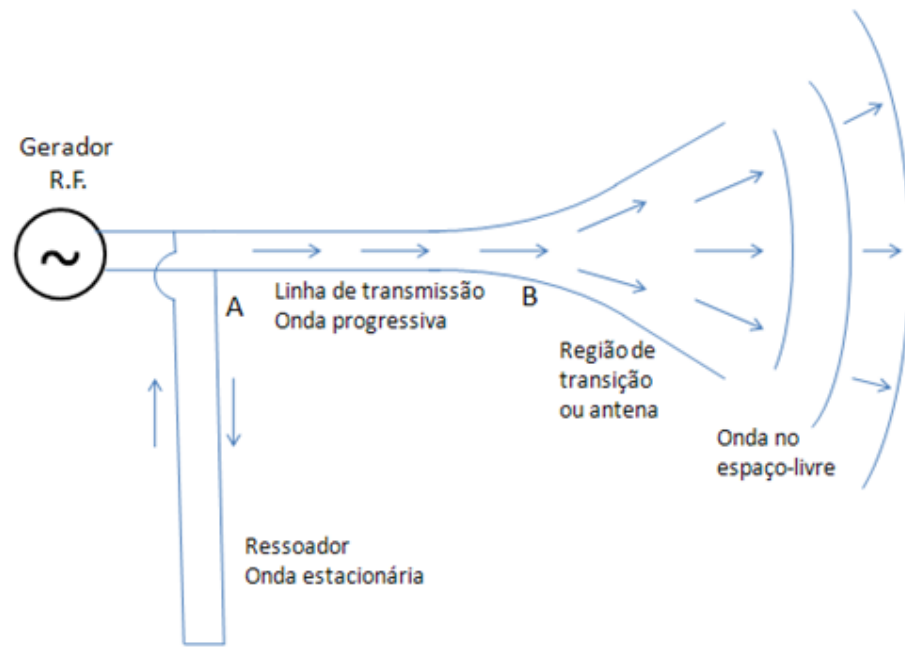


Figura 2.5.1 – A antena é uma região de transição entre uma onda guiada numa linha de transmissão e uma onda no espaço-livre [1].

Para o modelo genérico de uma linha de transmissão apresentado na figura 2.5.2,  $Z_0$  é a impedância característica,  $Z_c$  a impedância da carga a qual a linha está conectada e  $\Delta x$  o comprimento da linha. Para entender melhor o conceito de impedância característica é sugerido um circuito equivalente para um trecho da linha de transmissão [7], como a figura 2.5.3.

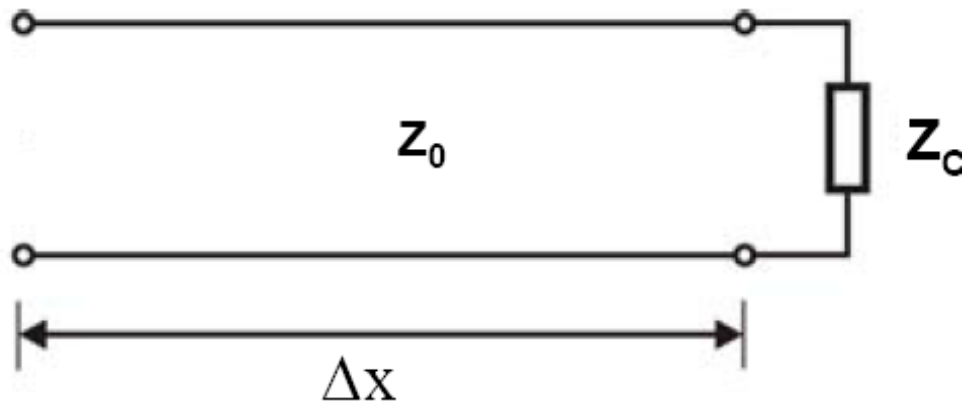


Figura 2.5.2 – Linha de transmissão genérica [7]

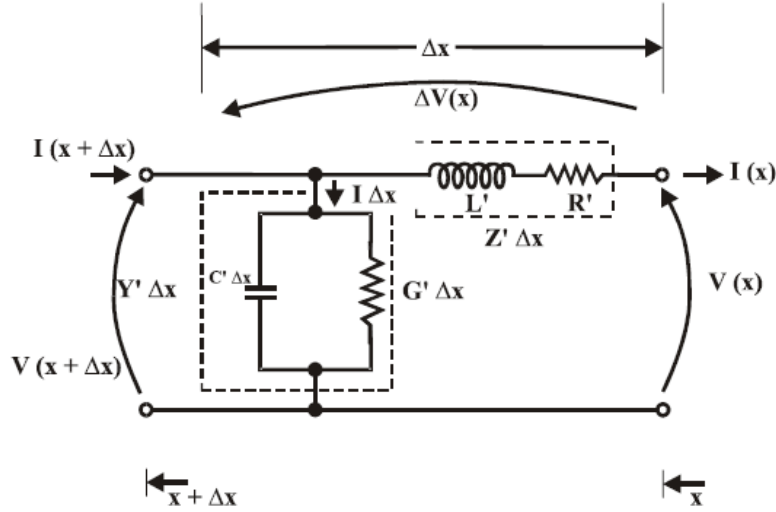


Figura 2.5.3 – Circuito equivalente para um trecho elementar da linha de transmissão. [7]

Sabendo que a definição de impedância em um circuito é a razão entre tensão, nos terminais, e a corrente, que flui no circuito, e levando em consideração o circuito equivalente proposto na figura 2.5.3, a impedância característica da linha de transmissão pode ser definida como:

$$\frac{V}{I} = \sqrt{\frac{Z'}{Y'}} = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} = Z \quad \text{II.24}$$

onde  $I$  e  $V$  são respectivamente corrente e tensão em algum ponto e  $R'$ ,  $L'$ ,  $G'$  e  $C'$  são respectivamente resistência, indutância, condutância e capacitância por unidade de comprimento [7].

Para uma linha de transmissão sem perdas,  $R'=0$  e  $G'=0$ , portanto:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad \text{II.25}$$

Ao longo da linha de transmissão a relação entre a tensão total e a corrente total é alterada conforme a variação da distância em relação à carga, e é expressa como:

$$Z(x) = Z_0 \frac{Z_C + jZ_0 \operatorname{tg}\beta x}{Z_0 + jZ_C \operatorname{tg}\beta x} \quad \text{II.26}$$

em que  $\beta$  é o número de onda e  $\lambda_g$  é o comprimento de onda guiado:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_g} \quad \text{II.27}$$

Geralmente nem toda a energia transferida para a antena é irradiada pela mesma.

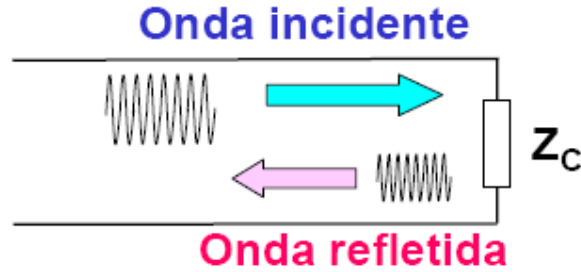


Figura 2.5.4 – Onda incidente e onda refletida [7].

Para uma linha de transmissão de comprimento  $l$ , sem perdas, com impedância característica  $Z_0$  e terminada por uma impedância de carga  $Z_c$  o coeficiente de reflexão na carga ( $\Gamma$ ) representa o quanto da onda incidente é refletida pela carga e é expresso como [7]:

$$\Gamma = \frac{Z_c - Z_0}{Z_c + Z_0} \quad \text{II.28}$$

A relação de onda estacionária (ROE) no software utilizado é expressa por VSWR (voltage standing wave ratio) e por essa razão a sigla que será utilizada para expressar este parâmetro será esta. O VSWR é definido por:

$$\text{VSWR} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad \text{II.29}$$

Para que o coeficiente de reflexão seja o menor possível é necessário que  $Z_c$  tenha o valor mais próximo possível de  $Z_0$ . Se os valores de  $Z_c$  e  $Z_0$  são iguais dizemos que há um “casamento de impedância”.

Representando a tensão e corrente nos terminais de entrada da antena isolada por  $I_A$  e  $V_A$ , respectivamente, a impedância de entrada é a impedância  $Z_A$  que a antena apresenta à linha de transmissão ou à estrutura de acoplamento que a une à linha de transmissão, como ilustrado na Figura 2.5.5.

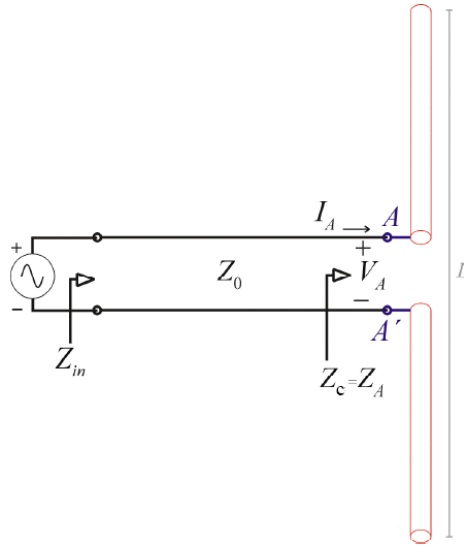


Figura 2.5.5 – Antena Dipolo alimentada por uma linha de transmissão de impedância característica  $Z_0$ . A impedância da carga  $Z_c$  da linha de transmissão é a impedância  $Z_A$  “vista” nos terminais de  $A$  e  $A'$  da antena [12].

Se a antena está isolada eletricamente (afastada de qualquer objeto eletricamente condutor e de dimensões comparável ao da antena) e a antena é considerada sem perdas (construída por condutores de alta condutividade e material dielétrico de baixa perda) sua impedância de entrada é igual a sua impedância própria referida aos terminais  $A$  e  $A'$ , expressa por:

$$Z_A = \frac{V_A}{I_A} = R_A + jX_A \quad \text{II.30}$$

Em que  $R_A$  é a resistência de radiação da antena e  $X_A$  reatância própria da antena, ambas referidas aos terminais  $A$  e  $A'$ .

O conhecimento da impedância de entrada de uma antena é de fundamental importância, pois é responsável pela eficiência com que se efetua a transferência de energia do transmissor para a antena (ou vice-versa), devido ao desejado “casamento de impedância” ( $\Gamma=0$ ).

Para representar esta impedância da antena geralmente é utilizado uma Carta de Smith. De uma maneira mais específica para o uso de antenas, a Carta de Smith é uma forma de representar a relação entre a impedância da carga, no caso a antena, e a fonte, no caso a linha de transmissão que a antena será ligada.

## 2.6- Parâmetros S (Parâmetros de espalhamento)

Circuitos lineares, operando com baixo sinal, podem ser caracterizados completamente pelos parâmetros medidos em seus terminais, sem o conhecimento prévio de sua constituição interna. A definição dos parâmetros lineares pode ser feita utilizando-se estruturas n-portas. Aqui será apresentada uma estrutura de quatro terminais (quadripolo), como na figura 2.6.1. Todas as definições e ilustrações deste item seguiram a referência [4].

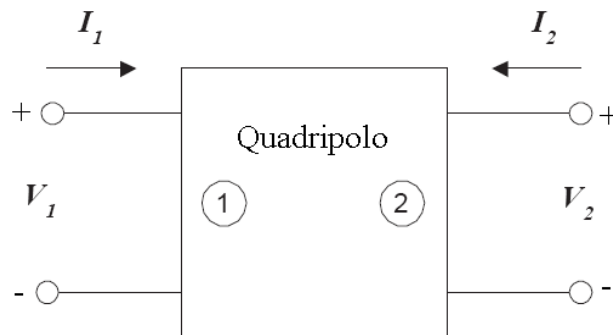


Figura 2.6.1 – Quadripolo linear [4].

Os parâmetros S, ou parâmetros de espalhamento, representam uma relação entre as ondas incidentes e as ondas refletidas nos terminais do quadripolo. A figura 2.6.2 mostra um quadripolo, sendo representado pelas tensões aplicadas e pelas ondas incidentes e refletidas nas portas 1 e 2.

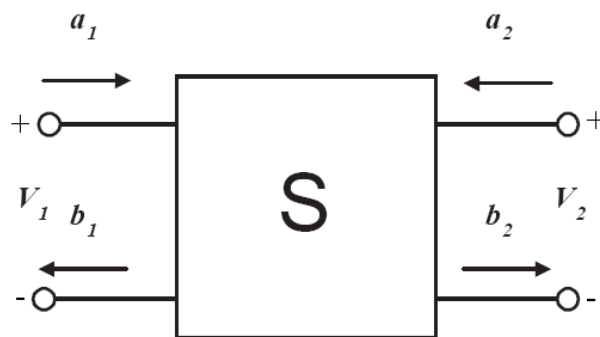


Figura 2.6.2 – Representação do parâmetro S [6].

Considerando o quadripolo descrito na figura 2.6.1 por um de seus parâmetros lineares, como os parâmetros Y, pode-se escrever:

$$I_1 = Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2 \quad \text{II.31}$$

$$I_2 = Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2 \quad \text{II.32}$$



Em que  $I_1, I_2, V_1, V_2$  representam as correntes e tensões eficazes totais nos terminais do quadripolo.

$$V_1 = E_{i1} + E_{r1} \quad \text{II.33}$$

$$V_2 = E_{i2} + E_{r2} \quad \text{II.34}$$

$$I_1 = \frac{E_{i1} - E_{r1}}{Z_0} \quad \text{II.35}$$

$$I_2 = \frac{E_{i2} - E_{r2}}{Z_0} \quad \text{II.36}$$

Em que  $E_{i1}, E_{r1}, E_{i2}, E_{r2}$  representam as tensões das ondas incidentes e refletidas nas linhas de entrada e saída, respectivamente.  $Z_0$  é a impedância característica das linhas.

Substituindo II.33, II.34, II.35 e II.36 em II.31 e II.32, pode-se arranjar as equações de modo que as tensões incidentes sejam as variáveis independentes e as tensões refletidas as variáveis dependentes. Resulta em:

$$E_{r1} = g_{11}(Y)E_{i1} + g_{12}(Y)E_{i2} \quad \text{II.37}$$

$$E_{r2} = g_{21}(Y)E_{i1} + g_{22}(Y)E_{i2} \quad \text{II.38}$$

Os parâmetros  $g_{11}, g_{12}, g_{21}, g_{22}$  dependem apenas dos parâmetros  $Y$  e representam um novo conjunto de parâmetros caracterizando o quadripolo através de tensões incidentes e refletidas, o que é mais natural no domínio de alta frequência e microondas.

Normalizando as equações II.37 e II.38 por  $\sqrt{Z_0}$ , pode-se escrever:

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \quad \text{II.39}$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \quad \text{II.40}$$

em que:  $b_1 = \frac{E_{r1}}{\sqrt{Z_0}} ; \quad b_2 = \frac{E_{r2}}{\sqrt{Z_0}} ; \quad S_{11} = g_{11}(Y) ; \quad S_{21} = g_{21}(Y)$

$$a_1 = \frac{E_{i1}}{\sqrt{Z_0}} ; \quad a_2 = \frac{E_{i2}}{\sqrt{Z_0}} ; \quad S_{12} = g_{12}(Y) ; \quad S_{22} = g_{22}(Y)$$

As equações II.39 e II.40 podem ser agrupadas na forma matricial, resultando:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad \text{II.41}$$

A matriz  $\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}$  é chamada de matriz S ( do inglês “SCATTERING”) do quadripolo ou matriz de espalhamento ( porque relaciona ondas refletidas e incidentes). Note-se que os quadrados dos módulos dos termos das equações II.39 e II.40 têm dimensão de potência.

$|a_1|^2$  = potência incidente na entrada do quadripolo

$|b_1|^2$  = potência refletida na entrada do quadripolo

$|a_2|^2$  = potência incidente na saída do quadripolo

$|b_2|^2$  = Potência refletida na saída do quadripolo

Os métodos utilizados acima para definir os parâmetros S de um quadripolo podem ser utilizados para definir parâmetros S de circuitos de n portas.

Observando-se as equações II.39 e II.40 nota-se que os parâmetros S são obtidos com as seguintes condições:

$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2 = 0} = \left. \frac{E_{r1}}{E_{i1}} \right|_{E_{i2} = 0} \quad \text{II.42}$$

$$S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2 = 0} = \left. \frac{E_{r2}}{E_{i1}} \right|_{E_{i2} = 0} \quad \text{II.43}$$

A condição  $a_2 = 0$  é obtida quando não há onda refletida pela carga  $Z_C$ , ou seja, quando  $Z_C = Z_0$ , que é a condição de terminação de uma linha de transmissão de impedância característica igual a  $Z_0$ .

Sendo assim, uma análise mais detalhada da equação II.42 mostra que  $S_{11}$  é o coeficiente de reflexão da entrada do quadripolo em relação à impedância  $Z_0$  da linha de transmissão. Do mesmo modo  $S_{21}$  poderá ser considerado um ganho ou atenuação (tensão de saída da onda normalizada dividida pela tensão de entrada da onda normalizada no quadripolo).

$S_{12}$  e  $S_{22}$  serão obtidos por:

$$S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1 = 0} = \left. \frac{E_{r2}}{E_{i2}} \right|_{E_{i1} = 0} \quad \text{II.44}$$

$$S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1 = 0} = \left. \frac{E_{r1}}{E_{i2}} \right|_{E_{i1} = 0} \quad \text{II.45}$$

A condição  $a_1 = 0$  implica não haver onda incidente na linha de entrada do quadripolo, o que é obtido fazendo  $Z_g = Z_0$  ( $Z_g$  é a impedância interna do gerador de RF) e alimentando o quadripolo no acesso de saída.

Nessas condições, portanto,  $S_{22}$  pode ser considerado o coeficiente de reflexão de saída em relação à  $Z_0$ .

Os parâmetros de espalhamento definem as características (identidade) dos dispositivos de n-portas.

## 2.7- Largura de Banda

A largura de banda pode ser considerada como o leque de frequências em ambos os lados de uma frequência central onde as características de uma antena ( impedância, diagrama de radiação, largura de feixe, polarização, nível de lóbulos laterais, ganho, diretividade) estão dentro de um valor aceitável em relação aos valores na frequência central. A largura de banda pode ser expressa sob diversas formas, as duas mais comuns são:

1. Forma percentual:

$$LB = \frac{f_2 - f_1}{f_{op}} \quad \text{II.46}$$

2. Relação dos extremos:

$$LB = f_2 - f_1 \quad \text{II.47}$$

### 3-Software Utilizado – HFSS

Para simular as estruturas irradiantes, foi utilizado o HFSS, da Ansoft, que é um software de alto desempenho para simulações dos campos eletromagnéticos em uma geometria 3D de qualquer dispositivo passivo. A integração entre simulação, visualização, modelagem da estrutura e obtenção de resultados precisos e rápidos é a grande vantagem deste software. O software fornece resultados como impedância de entrada, parâmetro de espalhamento, diagramas de radiação, VSWR, entre outros. Todas as citações deste capítulo seguiram o manual do software utilizado [11].

Para gerar uma solução dos campos eletromagnéticos, o HFSS emprega o método de elementos finitos (Finite Element Method - FEM), que é um método utilizado para solucionar problemas físicos em meios contínuos. Em geral o FEM divide o espaço todo a ser analisado em uma sequência de pequenas regiões e representa os campos em cada sub-região (elemento) com uma função local, transformando o contínuo em discreto. Essa função local é obtida através de equações diferenciais ou equações integrais, com suas respectivas condições de contorno, que são associadas com o problema a ser analisado, no caso do eletromagnetismo são as equações de Maxwell [2] que representam este fenômeno.

No software o modelo geométrico é automaticamente dividido em um grande número de tetraedros, onde um único tetraedro é uma pirâmide. Esta coleção de tetraedros é referida como malha de elementos finitos. É possível refinar a malha, ou seja, diminuir o tamanho dos tetraedros e, conseqüentemente, aumentar a quantidade deles, a fim de obter uma maior precisão nos resultados.

O método de malha adaptativa é empregado no software para que a malha mais eficiente possível seja utilizada para resolução. Este método refina a malha nos locais onde a variação de campo elétrico é maior.

Para a modelagem 3D, o software nos proporciona um ambiente com ferramentas que possibilitam a produção da estrutura a fim de chegar o mais próximo da geometria real. A estrutura modelada pode ser tão próxima da real quanto se queira.

Para obter uma simulação confiável, são necessários alguns passos fundamentais listados a seguir:

- 1- **Geração do Modelo Paramétrico** – Nesta etapa é preciso criar a geometria desejada para análise, definir as condições de contorno e as excitações.
- 2- **Configuração da análise** – Nesta etapa são definidas as configurações da solução desejada e a faixa de frequência a ser varrida.
- 3- **Resultados** – Criação de relatórios e gráficos de campo
- 4- **Loop de Resolução** – Esta etapa é responsável por analisar se os resultados estão convergindo para o esperado, e se é preciso um refinamento do modelo.

Primeiramente é preciso definir o tipo de solução do projeto. O tipo de solução do projeto define o tipo de resultado, como as excitações são definidas, e a convergência. O software disponibiliza as três possibilidades a seguir:

- **Driven Modal** – É adequado para o cálculo dos parâmetros de espalhamento em estruturas passivas, de alta frequência como um guia de onda, microstrip e linha de transmissão em que é aplicada uma onda a partir de uma fonte. A solução da matriz S é expressa em termos da potência incidente e refletida na estrutura.
- **Driven Terminal** – Calcula a solução com base nos terminais, na porta, de uma linha de transmissão. A solução da matriz S é expressa em termos de tensão e corrente nos terminais da estrutura.
- **Eigenmode**- É utilizado para calcular ressonâncias de uma estrutura. Este modo de solução encontra as frequências de ressonância da estrutura e os campos nestas frequências.

### **3.1- Geração do Modelo Paramétrico**

#### **3.1.1- Criação da Geometria**

Para a criação da geometria desejada, o software possui uma área de desenvolvimento semelhante a qualquer software que produz estruturas 3D. Ferramentas de coordenadas, associação de cores, desenhos de geometrias e tantas outras são disponibilizadas nesta área.

É possível uma interface com outros softwares de produção 3D importando arquivos de formatos mais comumente usados para a produção dessas geometrias.

Toda estrutura produzida no software precisa ser associada a algum material. O software possui uma lista de materiais com várias características que são consideradas ao solucionar as equações. Algumas das características mais importantes são:

- Permissividade dielétrica relativa
- Permeabilidade magnética relativa
- Condutividade
- Tangente de perdas Dielétrica
- Tangente de perdas Magnética

#### **3.1.2- Condições de Contorno**

As condições de contorno permitem controlar as características dos planos, faces, ou interfaces entre os objetos. São fundamentais para solucionar as equações de Maxwell.

Quando é associada uma condição de contorno a uma determinada estrutura, esta estrutura passa a ter as características da condição de contorno a ela empregada. As condições de contorno são utilizadas para reduzir a complexidade do modelo.

Existem três tipos de condições de contorno que devem ser definidas:

### **1- Excitações:**

- a. Wave Ports – Definida para excitações que vêm do meio externo
- b. Lumped Ports – Definida para excitações que estão presentes internamente na estrutura.

### **2- Representações de superfícies:**

- a. Simetria de planos
- b. Superfícies perfeitamente elétricas ou magnéticas
- c. Superfícies de radiação
- d. “Background” e superfícies exteriores

### **3- Propriedades dos materiais**

- a. Interface entre dois materiais
- b. Condutividade de um condutor

A definição das excitações e das representações de superfícies é de responsabilidade do usuário assegurar que estão corretamente definidas. A terceira, propriedades dos materiais, se trata apenas da associação do material à geometria produzida. O software se encarrega de relacionar as características do material ao sólido.

Na segunda classe de condições de contorno o item “d” trata de “background” e superfícies exteriores. Background é tudo que preenche o espaço que não esteja ocupado por algum objeto; superfícies exteriores são consideradas como o limite dessa região que envolve a estrutura.

A primeira condição de contorno será estudada no próximo item deste capítulo. A terceira condição de contorno, como exposto acima, não envolve conceitos complexos e sim um conhecimento do material que é utilizado na produção da estrutura. Para tratar da segunda classe de condição de contorno é necessária a introdução de algumas definições técnicas das condições de contorno que podem ser associadas a planos, superfícies e objetos. São elas:

- **Condutor elétrico perfeito** – Este tipo de condição considera que o campo elétrico é perpendicular à superfície, sem componente que tangencia a superfície. São associados automaticamente às superfícies que tocam as “superfícies exteriores” e a todo objeto em que a ele é associado o tipo de material, “condutor elétrico perfeito”.

- **Condutor magnético perfeito** – Considera que o campo elétrico é tangente à superfície.
- **Condutividade Finita** – Representa um condutor com perdas, imperfeito. O campo elétrico tem uma componente tangente à superfície.
- **Impedância** – É associado à estrutura um valor de impedância em que é necessário fornecer ao software um valor para a parte real e um valor para a parte imaginária da impedância.
- **Aglomerado RLC** – É associado à estrutura um valor de impedância, como o item acima, porém é necessário fornecer ao software valores de R, L e C.
- **Plano-terra infinito** – O plano-terra infinito é utilizado quando o plano-terra necessita atuar como uma barreira isolante da energia vinda de campos distantes, prevenindo assim que ondas se propagem após o plano-terra.
- **Simetria** - Usado para planos condutores elétricos ou magnéticos perfeitos simétricos. Possibilita modelar somente parte da estrutura, o que reduz o tamanho e a complexidade do projeto, reduzindo assim o tempo de simulação. Deve ser exposta à superfície exterior (fundo) e em uma superfície planar. A simetria aqui tratada não é igual à simetria mecânica.
- **Radiação** – É a transmissão de energia por meio de ondas eletromagnéticas para longe da fonte geradora. Uma condição de contorno de radiação, também referida como condição de contorno absorvente, permite caracterizar uma superfície como eletricamente aberta, isto é, as ondas podem radiar para fora da estrutura e através da superfície em que foi associada condição de contorno de radiação. O software simula uma absorção da onda na superfície em que a condição de radiação foi associada. Condições de contorno de radiação podem também ser colocadas relativamente perto de uma estrutura e pode ter formas arbitrárias. São utilizadas para simplificar a simulação.



Durante a modelagem é necessária a aplicação de um background. Nas “superfícies exteriores” do background é necessário aplicar uma condição de contorno de radiação, para que o software simule a propagação das ondas para lugares distantes em relação à origem. A superfície de radiação precisa estar localizada no mínimo a um quarto de onda da fonte de radiação. Em alguns casos a condição de radiação deve estar localizada perto de um quarto de onda, como quando esperado uma pequena energia radiada.

### 3.1.3 – Excitações

Uma porta é um tipo de condição de contorno que autoriza o fluxo de energia para dentro ou para fora de uma estrutura. É possível associar uma porta a qualquer objeto 2D ou face de objeto 3D. Antes de o campo eletromagnético tridimensional completo ser calculado dentro de uma estrutura, é necessário determinar o campo de excitação padrão para cada porta.

O padrão do software adota que todas as estruturas estão completamente integradas numa blindagem condutora sem energia propagando através delas. Para definir energia propagando através das estruturas é necessário definir excitações que podem ser de duas maneiras:

- 1- **Wave Ports** – É uma excitação que deve ser definida quando a energia aplicada à estrutura analisada é obtida do meio externo. Uma Wave Port é aplicada no limite do background, ou seja, na “superfície exterior”, definida anteriormente.
- 2- **Lumped Ports**- Uma Lumped Port é adequada para estruturas onde a excitação é definida internamente, isto é, em alguma superfície contida no modelo geométrico.

## 4 – Particularidades do sistema e tipos de antenas propostas

O sistema em que a antena será inserida possui algumas particularidades que influenciam diretamente na escolha da antena. O módulo transceptor é o responsável pela maioria dessas particularidades. A principal delas é a frequência em que o módulo transceptor opera, 2,4 GHz. Esta frequência é destinada a transmissões em curtas distâncias, é a mesma utilizada para transmissões que utilizam protocolos como Bluetooth e Zigbee. O valor de 2,4 GHz é um valor usual para referenciar toda faixa que o sistema utiliza para a transmissão de dados que vai de 2,400GHz a 2,485GHz e está centrada em 2,44GHz. O comprimento da onda para uma frequência de 2,4GHz é 125mm.

Outra característica importante é que o transceptor exibe em seus terminais, destinado ao acoplamento da antena, uma impedância de  $100+j175$  ohm. O fabricante recomenda um circuito transformador de impedância para 50 ohms. Este circuito é utilizado no projeto, por isso é considerado que a impedância disponibilizada para o acoplamento da antena é de 50 ohms.

Por se tratar de um dispositivo transmissor de som em que o principal objetivo é proporcionar mobilidade ao usuário, é de suma importância que a transmissão seja garantida mesmo com a mudança de posição e orientação do transmissor. Este requisito impõe a necessidade da antena projetada radiar o campo elétrico em todas as direções com a mesma intensidade, ou seja, onidirecionalmente.

Também, pelo mesmo motivo responsável pelo requisito acima descrito, ou seja, mobilidade, é necessário que o dispositivo tenha tamanho muito reduzido. Isto implica que o tamanho da antena deve ser o menor possível para que, como consequência, o produto tenha dimensões pequenas.

A portabilidade do sistema implica na necessidade do dispositivo ter consumo de energia relativamente baixo para que a fonte de energia mantenha o sistema ligado por um período satisfatório. Esta necessidade e o desejo de conseguir transmissão com a maior distância possível, entre o transmissor e o receptor, implicam na necessidade de conseguir uma ótima relação entre a energia destinada a ser transmitida e a energia realmente transmitida.

O número de tipos diferentes de antenas que existem é admiravelmente grande, porém cada uma delas é projetada para se adequar a um tipo de aplicação. A seguir serão apresentados os tipos de antenas que atendem os requisitos de projeto em questão, são elas antenas monopolo, em L, em F e antenas chip.

## 4.1- Antenas Monopolo

A antena com plano de terra, também chamada de monopolo, é constituída basicamente de um plano condutor, considerado como um refletor perfeito, de dimensões infinitas sobre o qual é colocado, perpendicularmente, o elemento radiante [7]. A Figura 4.1.1 mostra um esboço dessa antena. Um dos tipos de antena monopolo é a de um quarto de onda,  $L = \lambda/4$  [10].

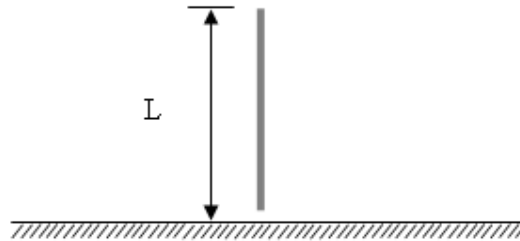


Figura 4.1.1 – Antena monopolo vertical [7].

Através do método das imagens [6] o plano de terra pode ser substituído por uma antena imagem de mesmo comprimento que o monopolo. Assim, para efeito de análise é como se existisse um dipolo de comprimento total  $2L$ , como é mostrado na Figura 4.1.2.

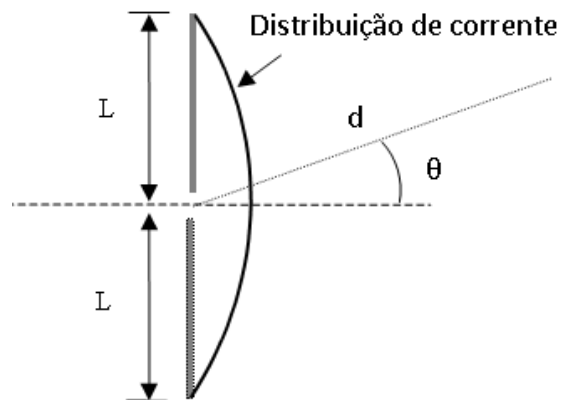


Figura 4.1.2 – Antena monopolo sob o efeito do método das imagens [7].

A figura 4.1.3 mostra que o diagrama de radiação horizontal é circular, mostrando assim uma característica importante dessa antena pela qual é bastante preferida, a de radiar igualmente em todas as direções [7]. Por isso é chamada de onidirecional.

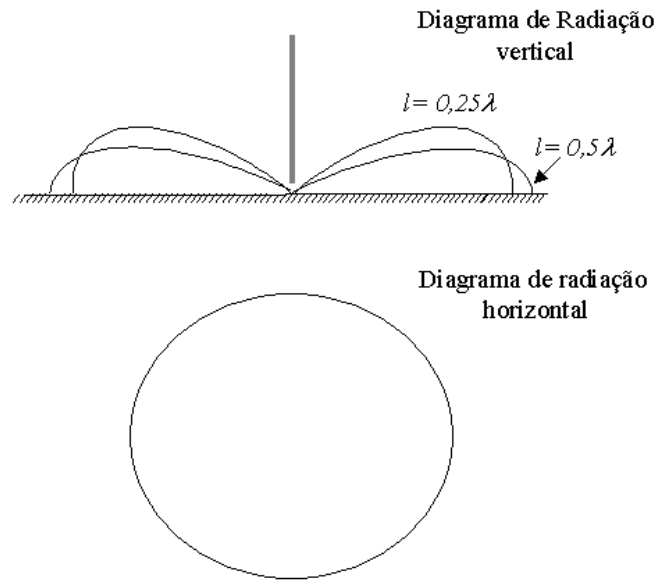


Figura 4.1.3 – Diagramas de radiação para uma antena tipo monopolo [7].

#### 4.2- Antenas em L invertida

A Figura 4.4 mostra a configuração básica de antenas em L. Essas antenas, que apresentam um perfil baixo e uma largura de banda estreita, são amplamente empregadas em automóveis e aviões [5]. Na antena tipo L, a seção vertical provê uma antena monopolo curta, que é carregada capacitivamente para produzir uma distribuição de corrente mais uniforme tipicamente  $h + \ell < \lambda/4$  [5]. A presença da seção horizontal reduz a altura enquanto se cria uma frequência ressonante que poderia, caso contrário, ser obtida para um monopolo curto de mesma altura [5]. Este tipo de antena produz radiação onidirecional.

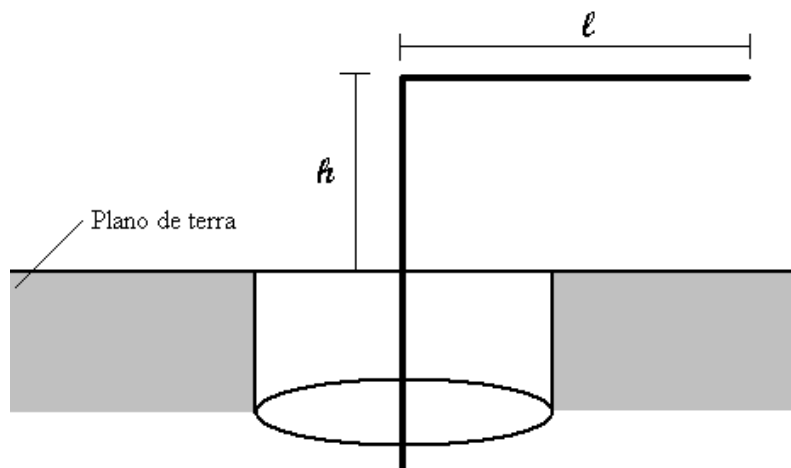


Figura 4.2.1- Antena em L invertida [5].

### 4.3- Antenas em F invertida

Na antena em F (Figura 4.3.1), a adição da seção AB em relação à antena em L, tratada no item anterior, permite um casamento de impedância através de uma sintonia indutiva da antena; tipicamente  $h + \ell \approx \lambda/4$  e  $d \ll \lambda$  [5]. A antena pode, então, ser implementada sem a necessidade de um circuito de casamento de impedância, caso a sintonia seja feita para um casamento de impedância da estrutura de acoplamento da antena.

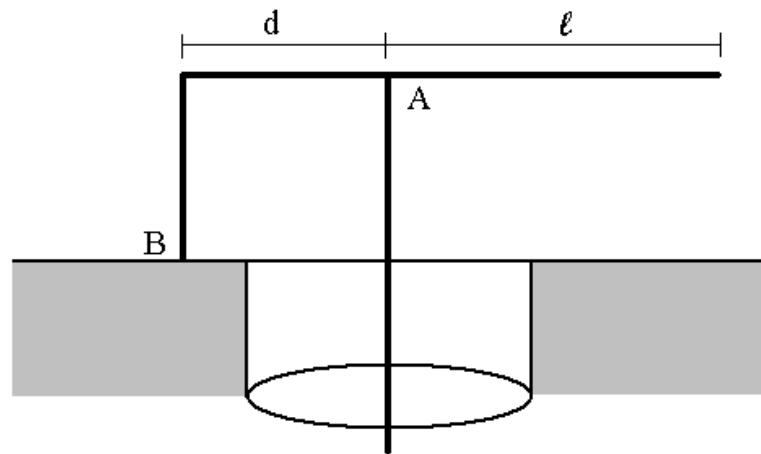


Figura 4.3.1 – Antena em F invertida [5].

Para aplicações em dispositivos de comunicações móveis, a antena em F é modificada para formar um F impresso (Figura 4.3.2) ou uma antena planar invertida em F (APIF). O tamanho e as características de radiação desse tipo de antena fazem dela um atrativo em aplicações em dispositivos de comunicação móveis, visto que elas podem ser prontamente incorporadas ao invólucro do dispositivo, o qual proporciona um plano de terra finito e no qual por sua vez conduz a radiação para longe do usuário [5]. Essa é uma característica considerada desejável em um dispositivo móvel pessoal.

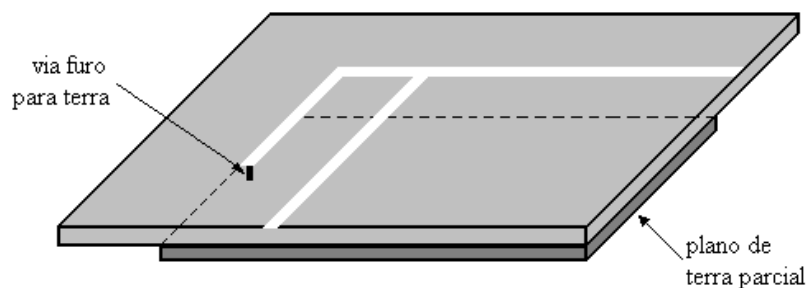


Figura 4.3.2- Antena em F impressa [5].

A largura de banda de uma antena planar invertida em F está relacionada à altura( $h$ ) da trilha ressonante acima do plano de terra; quanto maior o valor de  $h$ , maior a largura de banda desta antena [5]. Esta antena radia sinais polarizados tanto verticalmente quanto horizontalmente, que é novamente uma característica atrativa para aplicações em dispositivo móvel, onde não se garante a precisão da orientação da antena [5].

A possibilidade de utilizar este tipo de antena é bastante atraente, pois alguns fabricantes de módulos transceptores fornecem geometrias prontas, otimizadas e já validadas. Com a ferramenta de simulação é possível analisar a que melhor se encaixa as necessidades do projeto bem como pequenas alterações para verificar possíveis caminhos de otimização a serem seguidos. No capítulo 6 será feito um estudo nas estruturas predefinidas.

#### **4.4 – Antenas chip**

A possibilidade de utilização de antenas chip SMD é muito interessante devido a suas dimensões reduzidas e bom desempenho. Alta tecnologia é utilizada para a produção desse tipo de antena.

Uma tecnologia recente utilizada em alguns desses tipos de antena é a LTCC (low temperature cofired ceramic), que se trata de um processo de manufatura muito estável utilizado para inserir este tipo de antena em substratos cerâmicos. Esta tecnologia é responsável pelo encapsulamento da antena. Avanços nesta tecnologia têm resultado em materiais que são extremamente estáveis às grandes variações ambientais, produzindo uma antena que pode ser empregada em muitos tipos de aplicações.

O bom desempenho deste tipo de antena está totalmente associado ao tamanho do plano-terra por ser monopolo, como o tipo tratado anteriormente.

A maior desvantagem deste tipo de antena é o custo, pois se trata de um componente a mais que precisa ser adquirido para o produto.

## 5 – Características da antena atualmente empregada e requisitos para a nova antena

Como o estudo desenvolvido é um aperfeiçoamento de uma antena atualmente utilizada em um produto, é necessário primeiramente descrever as características desta antena.

### 5.1- Características da antena atual

A geometria da antena atual foi definida seguindo o modelo proposto pelo fabricante do módulo transceptor. A fim de atender os requisitos de alcance e pequeno volume a antena escolhida na ocasião foi uma antena com plano de terra, também chamada de monopolo, que é constituída basicamente de uma estrutura irradiante perpendicular a um plano condutor, considerado um refletor perfeito. A antena foi projetada para sua radiação ser próxima da onidirecional.

A estrutura é caracterizada então por um monopolo impresso com o tamanho propositalmente em 120% de  $\lambda/4$  (cento e vinte por cento de um quarto de onda), para que fosse possível o ajuste fino em testes de EIRP. A antena ocupa uma área de 16 mm x 7 mm, e a geometria é mostrada na figura 5.1.1. A figura 5.1.2 mostra o desenho de uma parte da PCB em que a antena foi inserida.

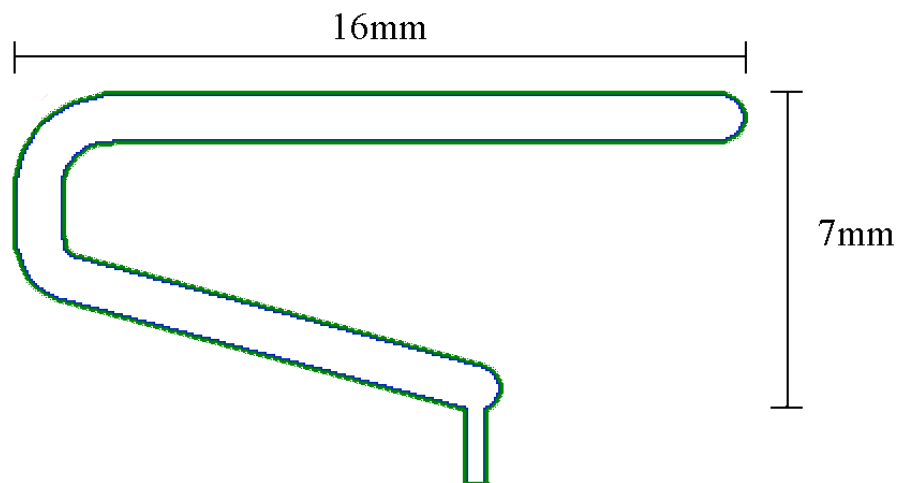


Figura 5.1.1 – Geometria da antena utilizada no produto.

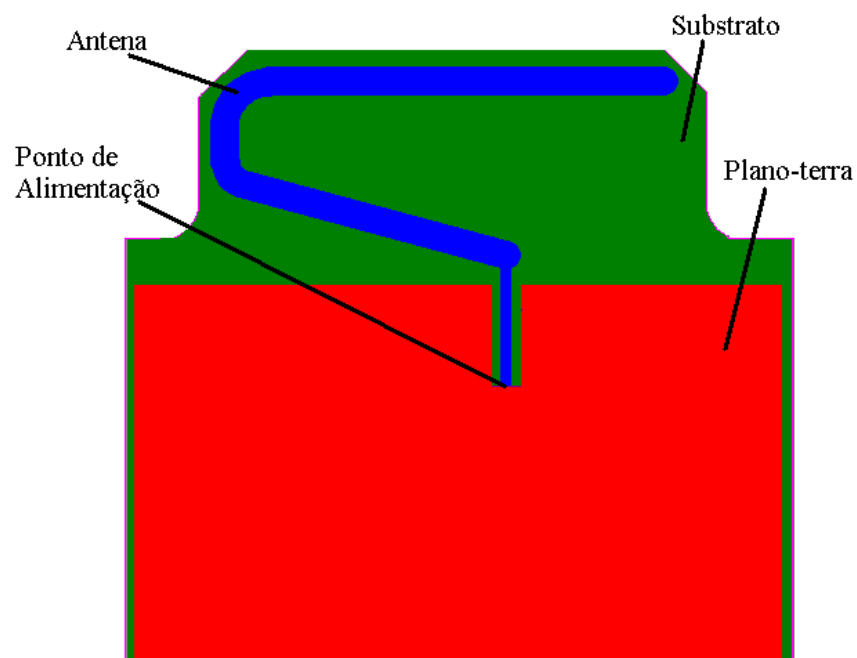


Figura 5.1.2 – Parte da PCB em que a antena foi inserida.

O transmissor em questão possui uma fonte de energia acoplada no plano inferior da PCB. A Figura 5.1.2 traz um desenho da PCB total bem como o posicionamento desta fonte de energia no dispositivo.

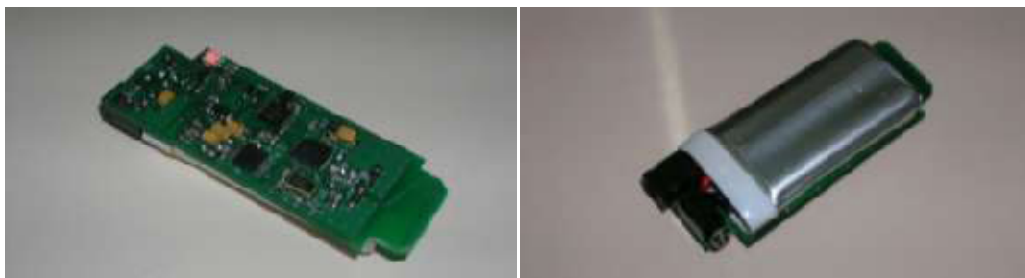


Figura 5.1.3- Posição da bateria no produto.

Para medição da impedância de entrada da antena foi utilizado o analisador vetorial do laboratório do fabricante na Noruega, Nordic Semiconductor [18], e foi medido o valor de  $79,12 + j 106,5$  para a frequência de 2,441GHz. A carta da impedância medida é mostrada na figura 5.1.3.



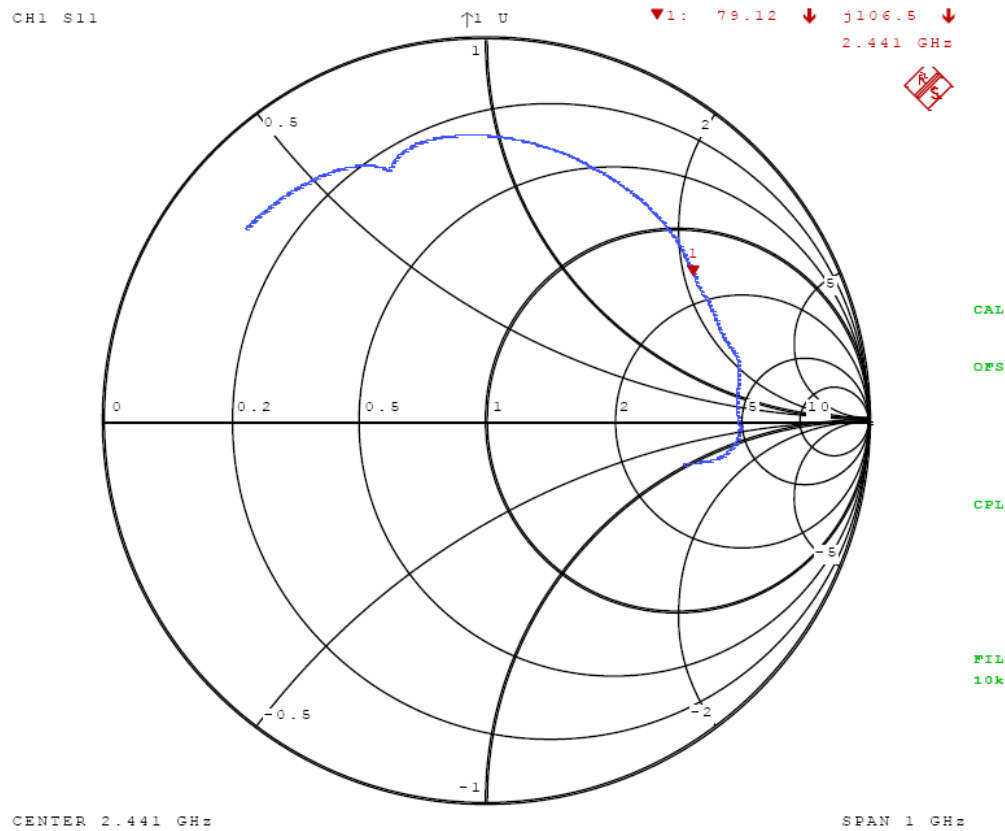


Figura 5.1.4 – Variação da impedância da antena atual sem o casamento de impedância.

Com a impedância medida, o VSWR ( voltage standing wave ratio) é muito alto, para o casamento com a saída  $50+j0$  ohm, conforme calculado abaixo:

$$|\Gamma| = \left| \frac{Z_C - Z_0}{Z_C + Z_0} \right| = \left| \frac{(79,12 + j106,5) - 50}{(79,12 + j106,5) + 50} \right| = \left| \frac{29,12 + j106,5}{129,12 + j106,5} \right| = 0,6597$$

V.1

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} = 4,877$$

V.2

Para uma melhora do VSWR, foi aplicado ajuste fino do casamento de impedância na saída  $50+j0$  ohm. A variação da impedância medida nos laboratórios do fabricante ficou da seguinte forma:

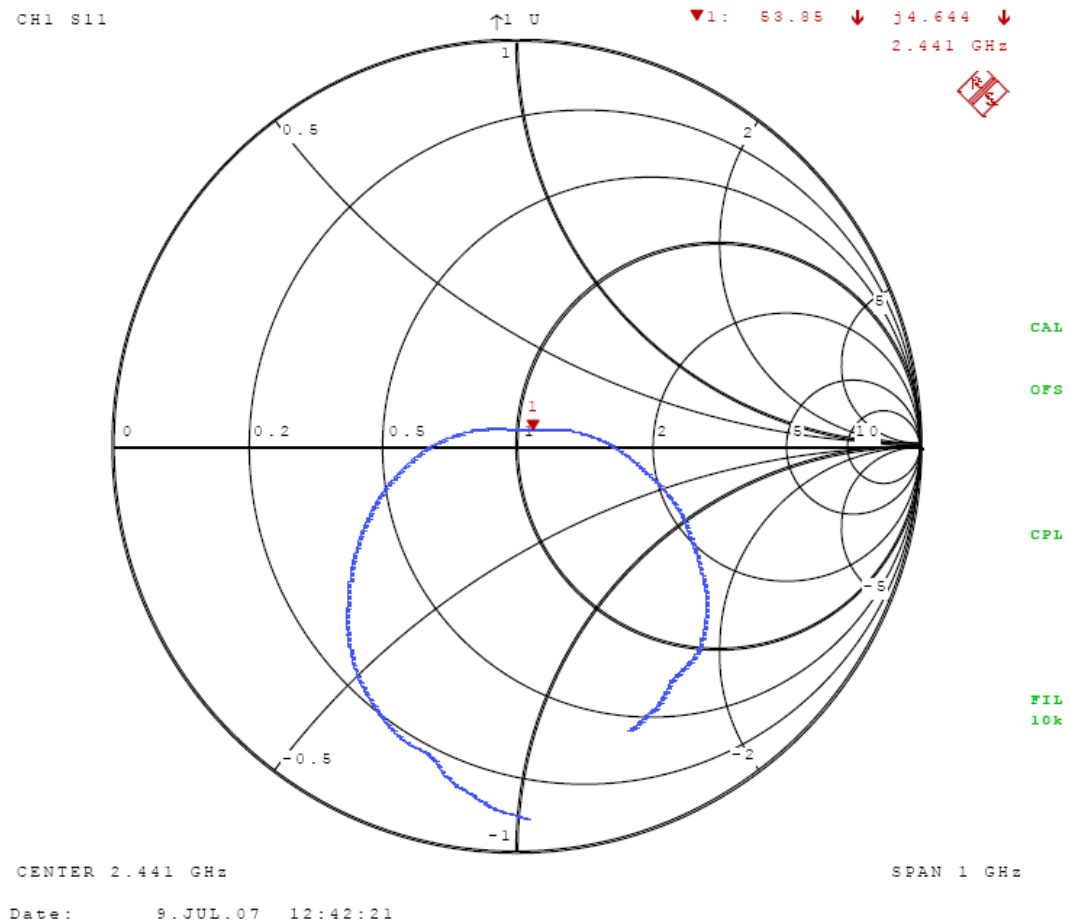


Figura 5.1.5 – Variação da impedância da antena atual após o casamento de impedância.

Após as modificações o VSWR medido foi mais satisfatório e está representado no gráfico da Figura 5.1.6.

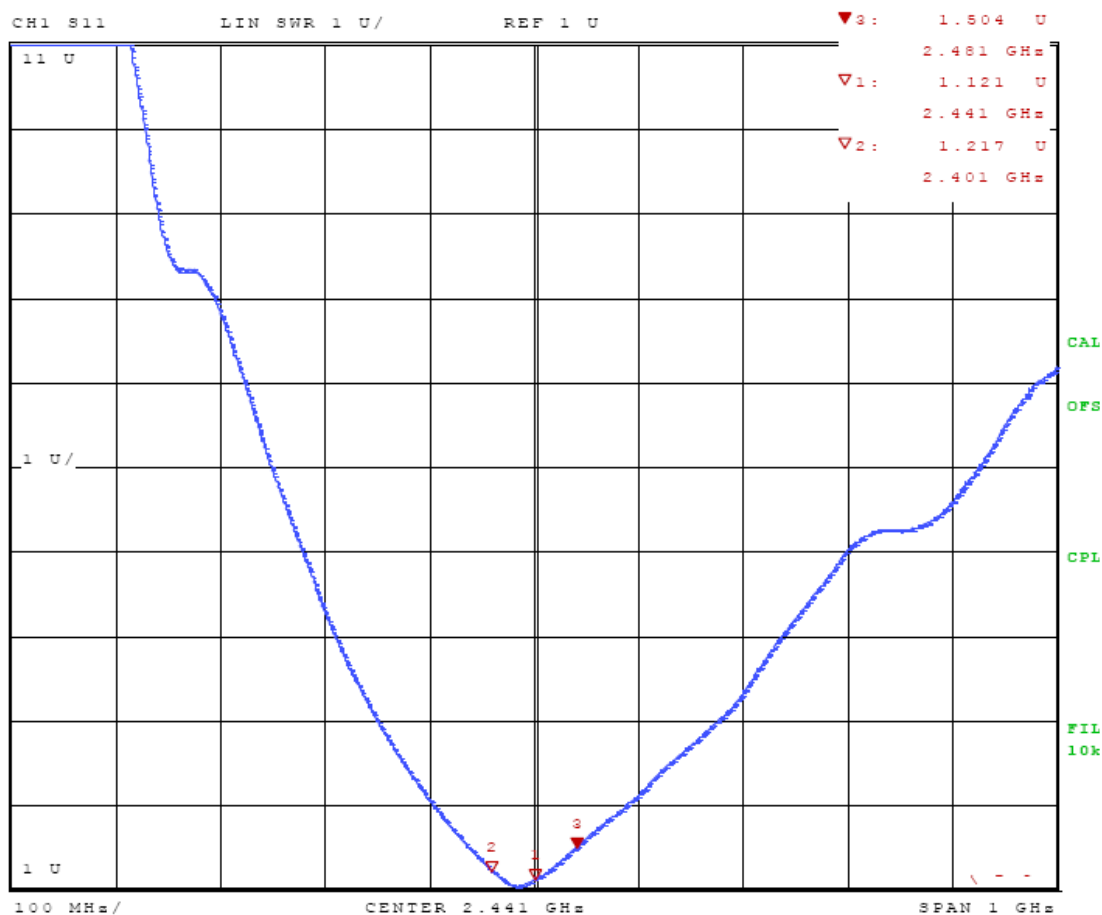


Figura 5.1.6 – VSWR medido para antena atual.

O ponto 1 marcado no gráfico da figura 5.1.6 representa a frequência mediana de 2,441GHz e seu valor de VSWR = 1,121. As frequências extremas do sistema, 2,401GHz e 2,481GHz, também tiveram seus valores para VSWR medidos e foram respectivamente, 1,217 e 1,504.

Testes de radiação da antena também foram feitos. Os testes foram executados em uma câmara anecóica do IFI/CTA – Instituto e Fomento de Coordenação Industrial/ Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial.

O diagrama de radiação vertical está mostrado na figura 5.1.7 e os resultados mostrados a seguir.

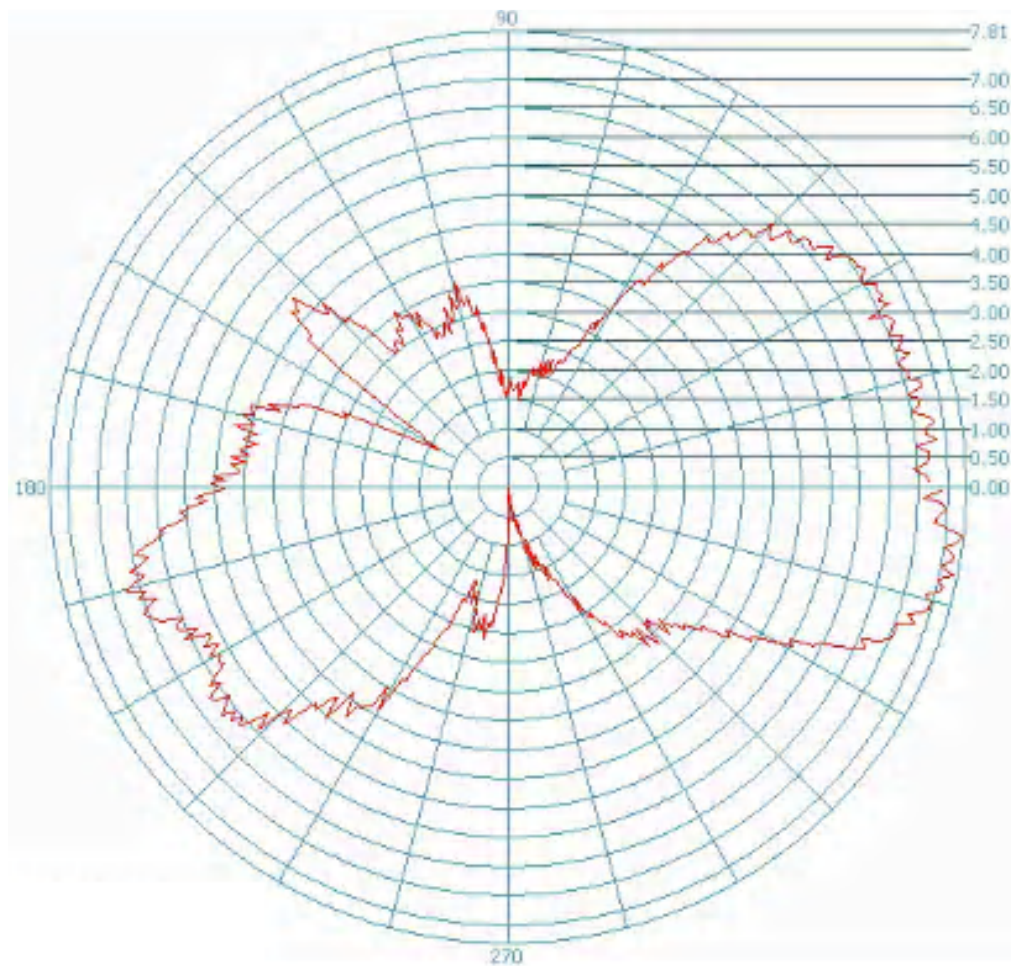


Figura 5.1.7 – Diagrama de radiação polar vertical da antena atual.

Para o diagrama de radiação vertical foi medido uma diferença entre o pico e o vale de potência de 7,81dB.

O diagrama de radiação horizontal é mostrado na figura 5.1.8.

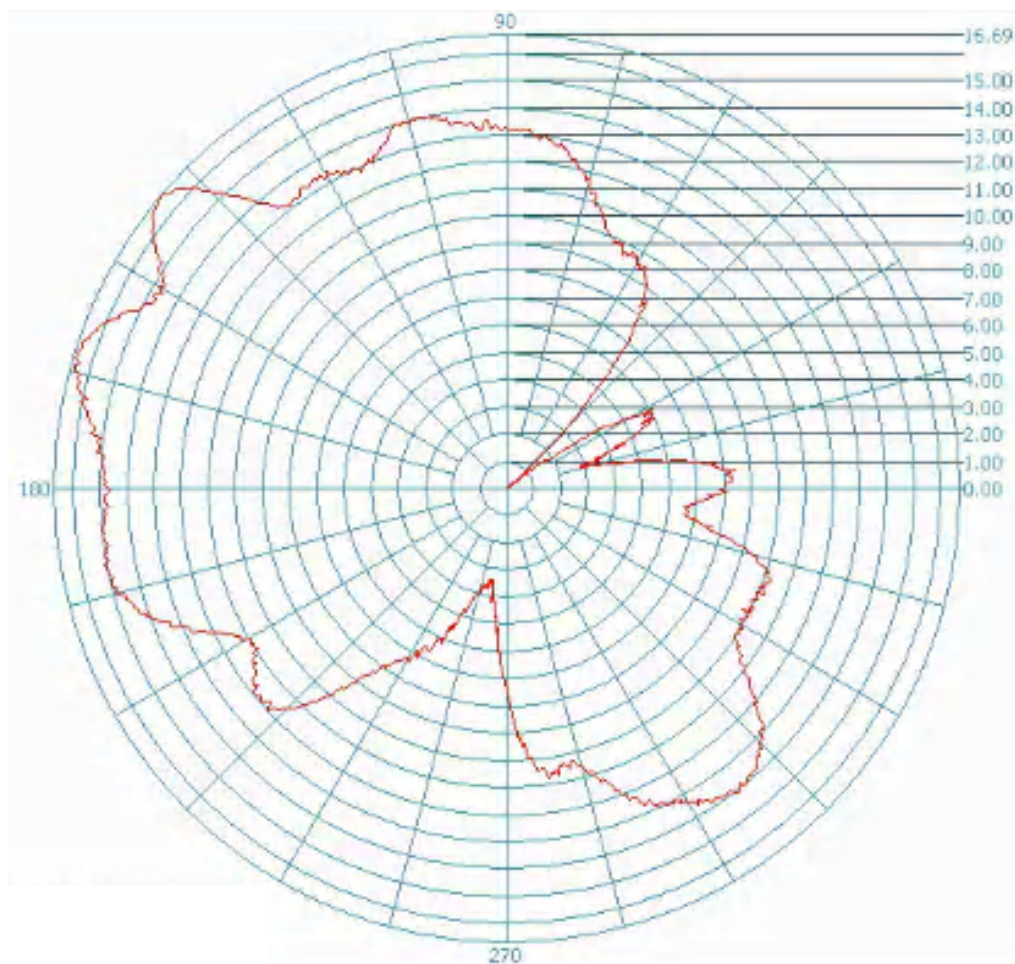


Figura 5.1.8 – Diagrama de radiação polar horizontal da antena atual.

No diagrama de radiação horizontal foi medida uma diferença entre o pico e o vale de potência de 16,69 dB.

É possível caracterizar, devido aos resultados dos diagramas de radiação, uma radiação com muitas imperfeições e não onidirecional.

Analisando a antena atual é possível caracterizá-la por meio da Tabela 1.

	Antena Moovi Atual	Observações
Frequência Central	2,45GHz	
Dimensões	7,5mm x 16 mm = 120mm <sup>2</sup>	
Impedância de entrada	79,12 + j 106,5	2,441GHz
VSWR	1,5 (2,481GHz) 1,121(2,441GHz) 1,217 (2,401GHz)	Após o casamento fino de impedância
Diagrama de Radiação	Imperfeito	
Custo	0	

Tabela 1 – Caracterização da antena atual do produto.

## 5.2 – Requisitos para a próxima antenna

A nova antenna que irá integrar o novo produto deverá atender a todos os requisitos de projeto. Diante de todos os objetivos alcançados com a antenna atual, a nova antenna deverá ser suficientemente melhor que a antenna atual.

A nova antenna deverá se enquadrar aos requisitos mostrados na tabela 2.

	Nova antenna
Frequência central	2,45Ghz
VSWR	< 1,35 (2,400GHz a 2,485GHz)
Impedância	50 Ohms
Diagrama de radiação	Onidirecional
Dimensões	Desejável menor que 80mm <sup>2</sup>

Tabela 2 – Requisitos para nova antenna.

A antenna será alocada em placa FR-4 epoxy com 0,8mm de espessura.

Para ajuste fino de casamento, uma rede  $\pi$  de casamento de impedância, pode ser utilizada.

Deve ser considerado pelo menos 2mm adicionais de impressão na antenna, caso a antenna escolhida seja do tipo impressa, antes do ajuste fino do casamento.

## 6- Modelos de antenas avaliados

A necessidade de os fabricantes de módulos transceptores promoverem cada vez mais a utilização desse tipo de produto entre os projetistas de dispositivos eletrônicos motivaram um grande esforço no desenvolvimento de antenas que possam tornar a eficiência de seus módulos cada vez maior. É de interesse dos fabricantes que os projetistas conheçam essas antenas para que possam fazer o uso de seus transceptores da melhor forma possível.

Geometrias de antenas são facilmente encontradas em notas técnicas e até mesmo em datasheets de módulos transceptores que operam na frequência de utilização do produto em questão [12] [14].

Em contrapartida, fabricantes de antenas chip realizaram muitos estudos e grandes investimentos no desenvolvimento de técnicas para que este tipo de antena consiga um alto desempenho para ser empregado cada vez mais com os módulos.

Este capítulo apresentará alguns modelos de antenas, bem como suas respectivas simulações e caracterizações.

### 6.1 - Microchip

A Microchip disponibiliza no datasheet do modulo transceptor MRF24J40 um modelo de antena IFA de pequenas dimensões e impedância de 50 Ohms [13]. No datasheet são também disponibilizados gráficos que podem servir para validar a utilização do software. A seguir são mostrados algumas comparações dos resultados simulados e resultados disponibilizados pelo fabricante [13]. A figura 6.1.1 mostra as dimensões da antena sugerida pela Microchip.

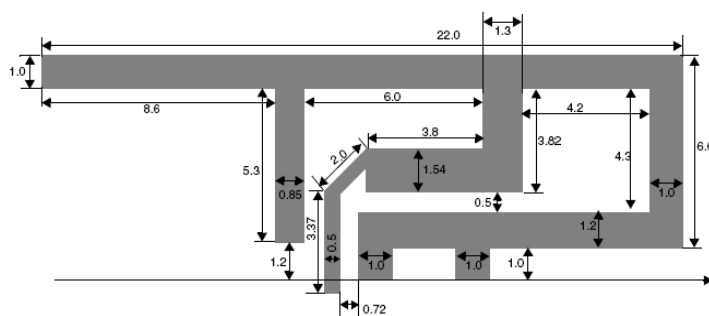


Figura 6.1.1 – Antena Microchip e suas dimensões em milímetros [13].

A antena em questão tem 22mm de largura e 7,6mm de altura. A área total ocupada pela antena em questão é de 167,2 milímetros quadrados. O tamanho é um fator negativo, já que é maior que antena atualmente utilizada, porém suas características podem compensar o fato de as dimensões serem maiores.

A figura 6.1.2 mostra o plano superior e inferior da PCB em que a antena foi analisada.



Figura 6.1.2 – Plano PCB superior e inferior da antena Microchip [13].

Para simulação no software foi produzida uma geometria (Figura 6.1.3) de forma a se aproximar da real geometria sugerida pelo fabricante.

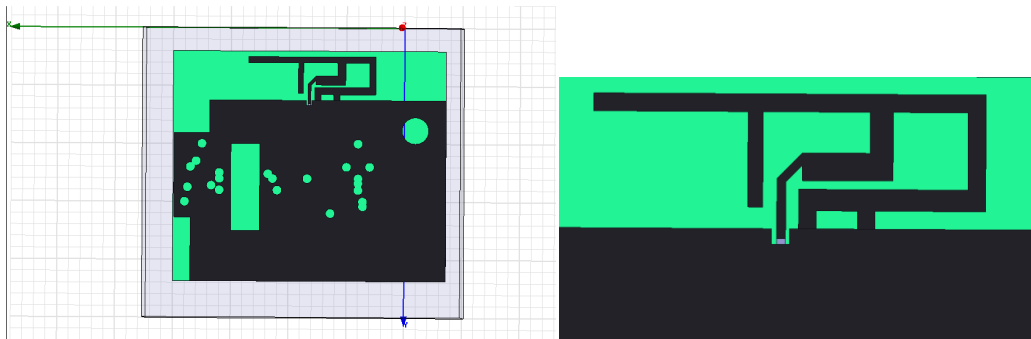


Figura 6.1.3 – Como foi modelado a antena Microchip no software.

Para a simulação no software, HFSS, o ambiente em que a estrutura é inserida foi produzido, uma caixa de ar (Figura 6.1.4), com as dimensões sugeridas pelo manual do software, isto é, no mínimo um quarto do comprimento de onda nas direções de máxima radiação.



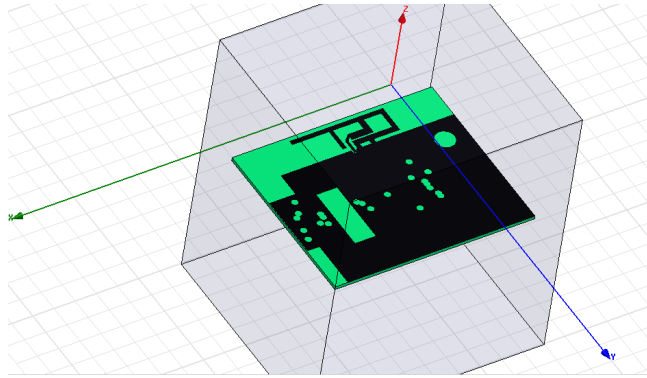


Figura 6.1.4 – Detalhe do bloco de ar com a antena Microchip inserida.

A figura 6.1.5 mostra o gráfico do parâmetro espalhamento,  $S_{11}$ , pela frequência, disponibilizado pelo fabricante.

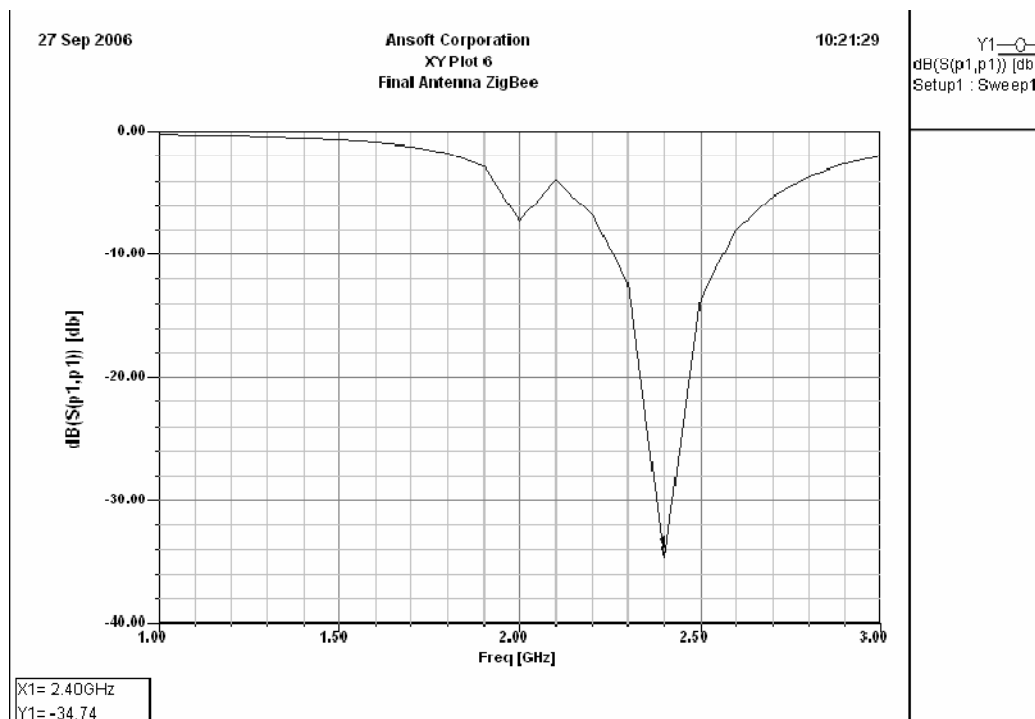


Figura 6.1.5 - Parâmetro  $S_{11}$  da antena Microchip fornecido pelo fabricante [13].

A Figura 6.1.6 foi obtida da simulação feita pelo HFSS.

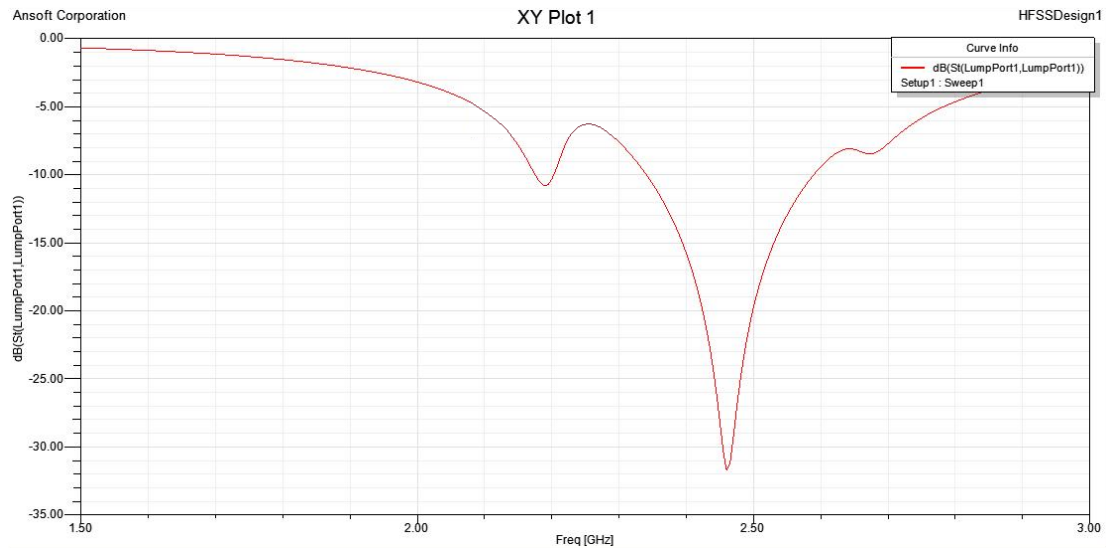


Figura 6.1.6 – Parâmetro  $S_{11}$  da antena Microchip simulado no HFSS.

Comparando a Figura 6.1.5 e a Figura 6.1.6, é possível observar que as formas dos gráficos se assemelham. O gráfico fornecido apresenta um vale de -34,74dB para frequência de 2,4GHz e o gráfico simulado apresenta um vale próximo de -32dB para frequência de 2,45GHz. Estes gráficos representam que ao incidir uma onda com frequência de 2,45GHz ela retorna com perda de -34,74dB (- 32dB quando simulado) e irradia o resto.

A Figura 6.1.7 e a Figura 6.1.8 são mostradas a seguir para representar o parâmetro de espalhamento  $S_{11}$  por meio da Carta de Smith, novamente é observado semelhança entre elas.

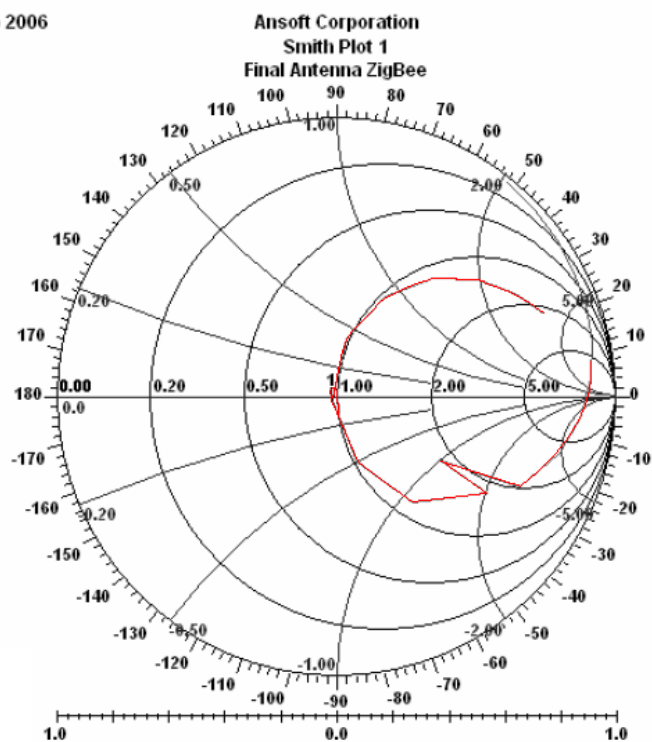


Figura 6.1.7 – Variação do parâmetro de espalhamento  $S_{11}$  fornecida pela Microchip, representado por meio da Carta de Smith.

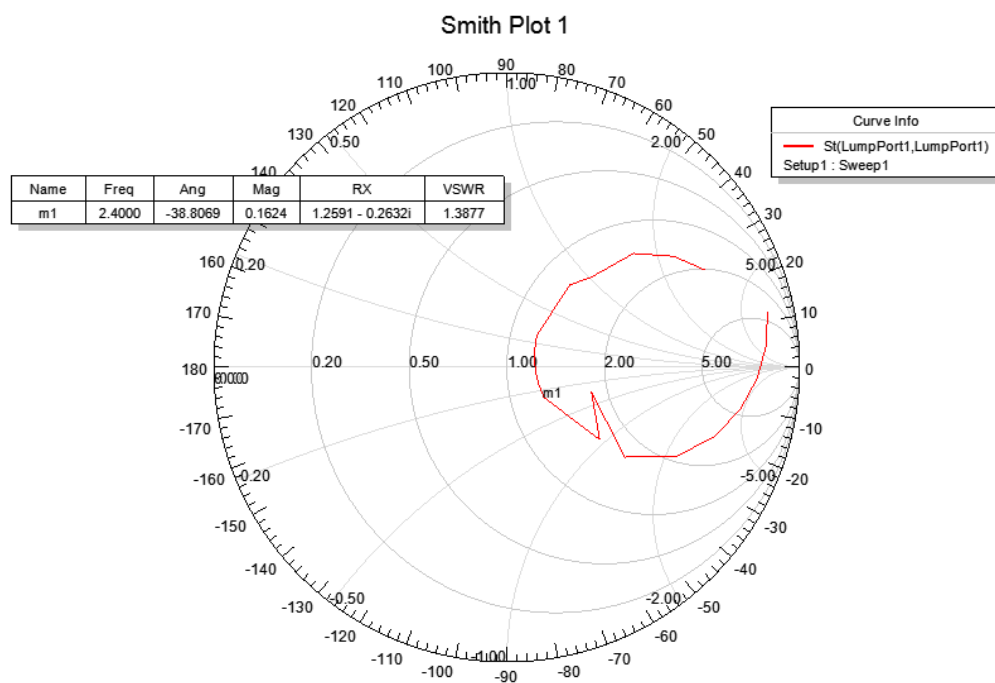


Figura 6.1.8- Variação do parâmetro de espalhamento  $S_{11}$  simulado, representado por meio da Carta de Smith.

A Figura 6.1.9 representa o VSWR medido para a antena da Microchip, a Figura 6.1.10 mostra o VSWR simulado para a mesma antena.

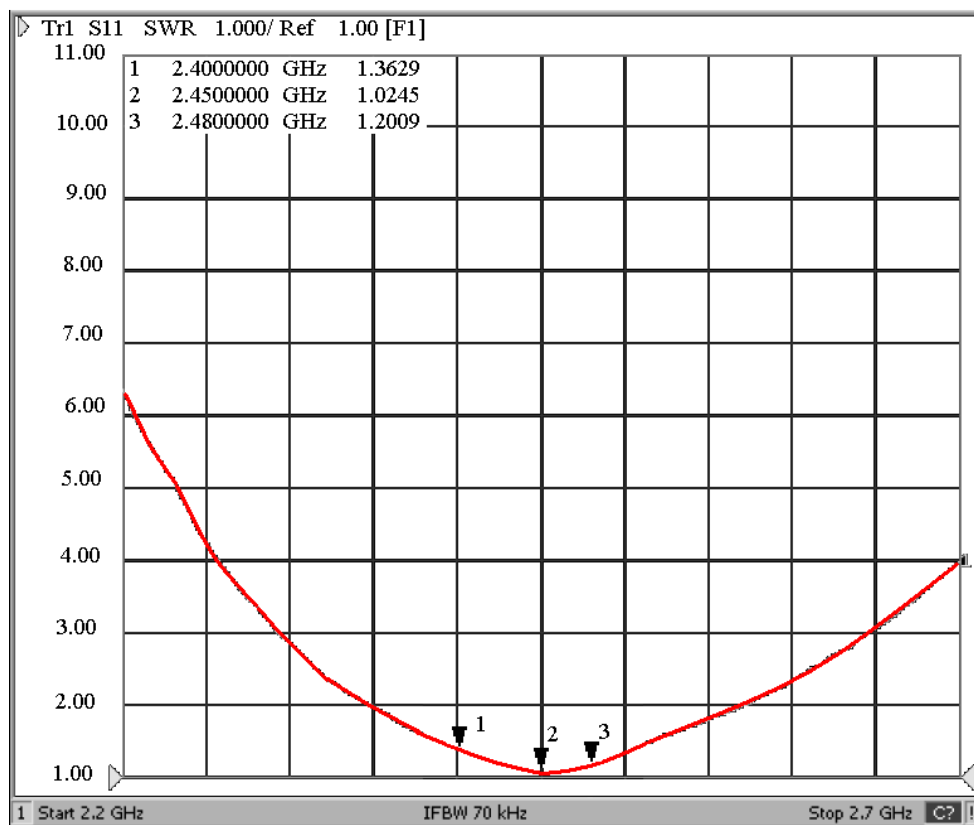


Figura 6.1.9 – Gráfico do VSWR fornecido pela Microchip [13].

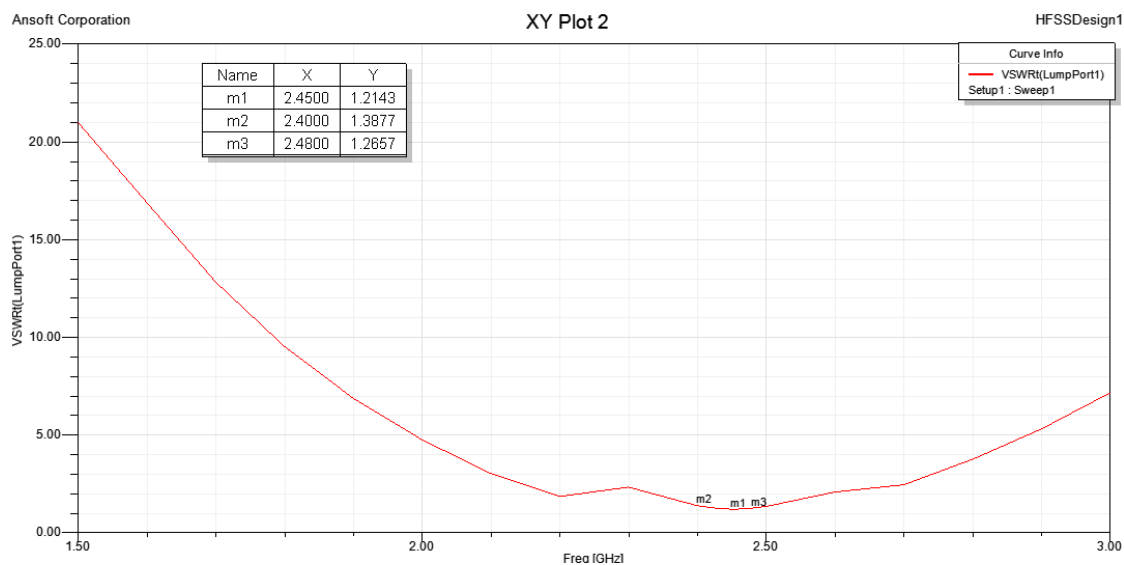


Figura 6.1.10 – Gráfico do VSWR simulado da antena Microchip.

Na Figura 6.1.9 o VSWR medido para frequência central de 2,450GHz foi de 1,0245, já na Figura 6.1.10 foi de 1,2143 para mesma frequência. Para a frequência de 2,40GHz o valor obtido pelo datasheet foi de 1,3629, já o simulado foi de 1,387. Para frequência de 2,48GHz foram obtidos os valores de 1,2009 e 1,2657, respectivamente para valores divulgado no datasheet e valor simulado.

As Figuras 6.1.11 e 6.1.12 mostram respectivamente as impedâncias obtidas do datasheet e as simuladas, nas frequências de operação do sistema. A comparação das partes resistiva foram bem satisfatórias e do gráfico da impedância obtida do datasheet foram (respectivamente para as frequências de 2,4GHz, 2,45GHz e 2,48GHz) 49,825ohms, 51,325ohms e 50,831ohms; as simuladas, respectivamente para as mesmas frequências, foram de 51,66ohms, 51,545ohms e 51,675ohms. Há uma pequena diferença entre as partes imaginárias das impedâncias. As partes obtidas do datasheet foram (respectivamente para as frequências de 2,4GHz, 2,45GHz e 2,48GHz) 15,148ohms , 0,553ohms e 9,0302ohms, já as simuladas podem ser consideradas desprezíveis. Os módulos obtidos do datasheet foram (respectivamente para as frequências de 2,4GHz, 2,45GHz e 2,48GHz) 52,077ohms, 51,327ohms e 51,567ohms; as simuladas, respectivamente para as mesmas frequências, foram de 51,66ohms, 51,545ohms e 51,675ohms.

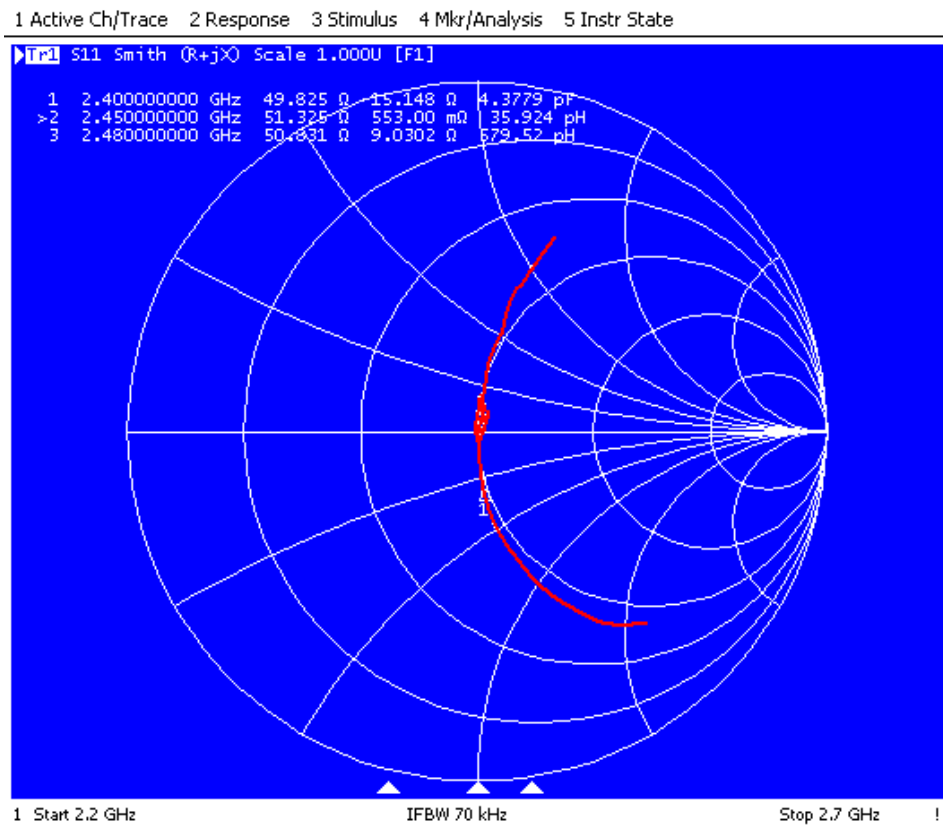


Figura 6.1.11 – Variação da impedância da antena fornecido pela Microchip [13].

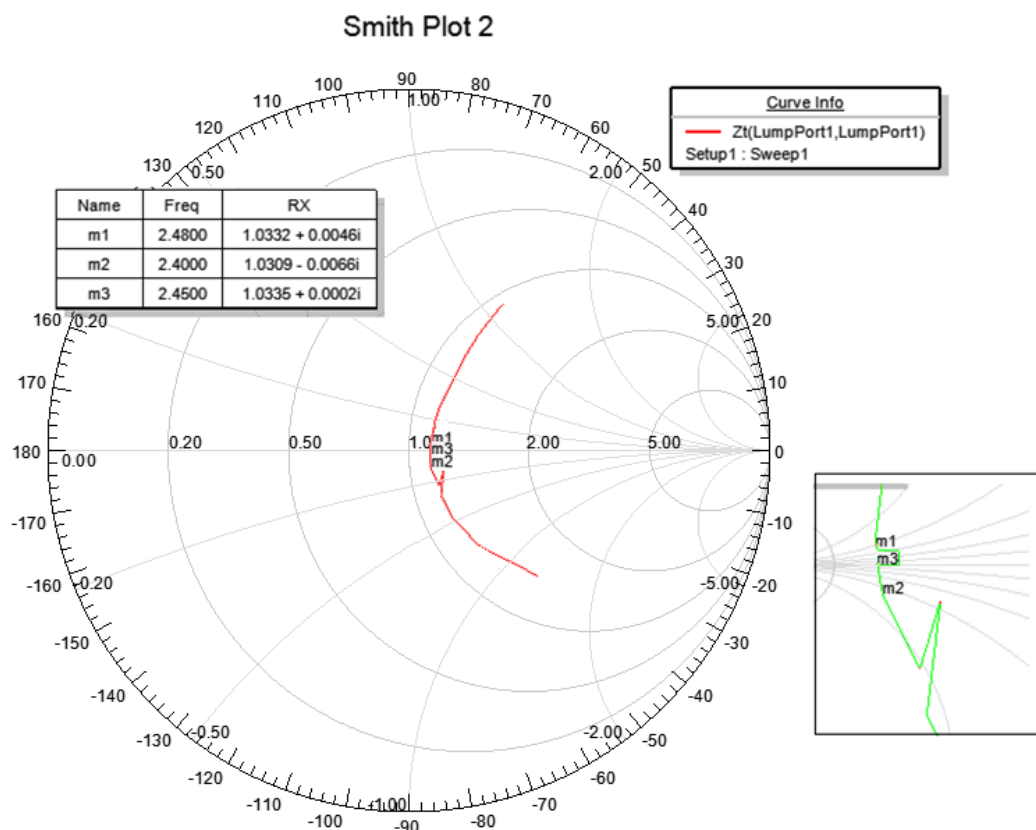


Figura 6.1.12 – Variação da impedância da antena simulada Microchip.

Diante da semelhança entre os valores obtidos do datasheet e os valores simulados em software, é possível caracterizar a simulação como válida.

A grande função do software, depois de validado, é de possibilitar a obtenção de parâmetros que não foram disponibilizados no datasheet. No caso da antena que a Microchip disponibilizou, ficou faltando o diagrama de radiação. Este parâmetro está representado a seguir na forma 3D (Figura 6.1.13) e na forma polar (Figura 6.1.14).

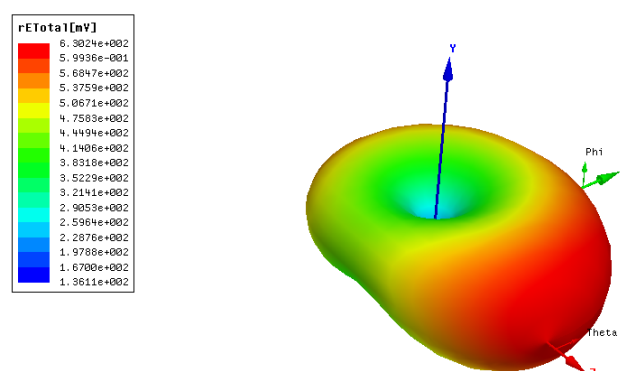


Figura 6.1.13 – Diagrama de radiação 3D simulado

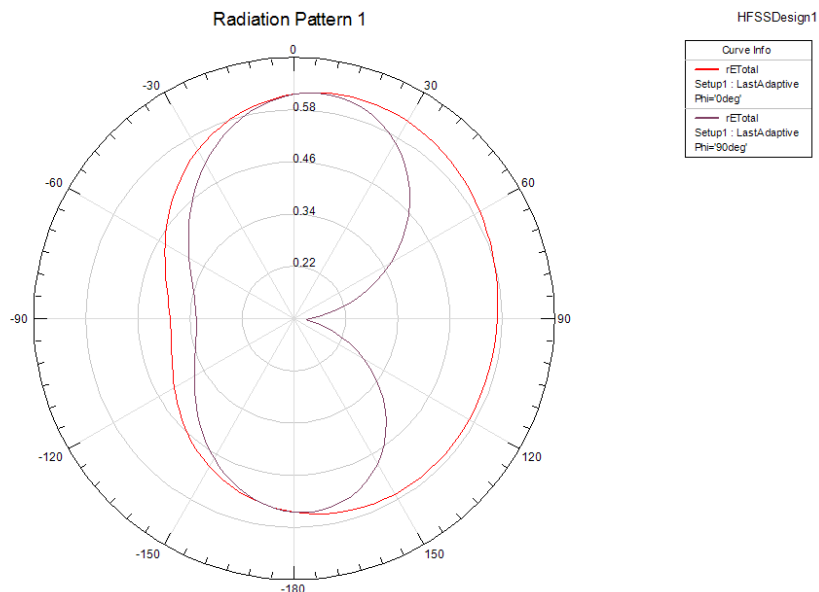


Figura 6.1.14 – Diagrama de radiação 2D simulado, em vermelho o diagrama horizontal e em roxo o diagrama vertical.

Os diagramas de radiação obtidos possibilitam a caracterização da antena como sendo onidirecional, porém com imperfeições de simetria. Claramente o diagrama horizontal não é simétrico para  $90^\circ$  e para  $-90^\circ$ . O diagrama vertical possui um lóbulo maior que o outro.

Após as análises feitas anteriormente é possível caracterizar a antena em questão pela Tabela 3.

	Microchip MRF24J40	Observações
Frequência Central	2,45GHz	
Dimensões	7,6mmx22mm = 167,2mm <sup>2</sup>	
Impedância de entrada	51,325 ohms	Para 2,450GHz
VSWR	1,3629(2,40GHz) 1,0245 (2,450GHz) 1,2009 (2,480GHz)	Disponibilizado no datasheet
Diagrama de Radiação	Onidirecional	Com imperfeições
Custo	0	

Tabela 3 – Caracterização da antena da Microchip.

## 6.2 – Chipcon Products

A Chipcon Products, que foi adquirida pela Texas Instruments, descreve em sua nota de aplicação AN043, uma antena de 2.4GHz com dimensões de 15.2 mm x 5.7 mm, que promete VSWR menor que 2 quando conectado a uma fonte de 50 Ohms [14].

As figuras deste item referente aos testes feitos pelo fabricante foram adquiridas da nota de aplicação disponibilizada no site da empresa [14].

A Figura 6.2.1 mostra a antena em um produto de interface Bluetooth. Foi neste produto que os parâmetros fornecidos na nota de aplicação foram medidos.

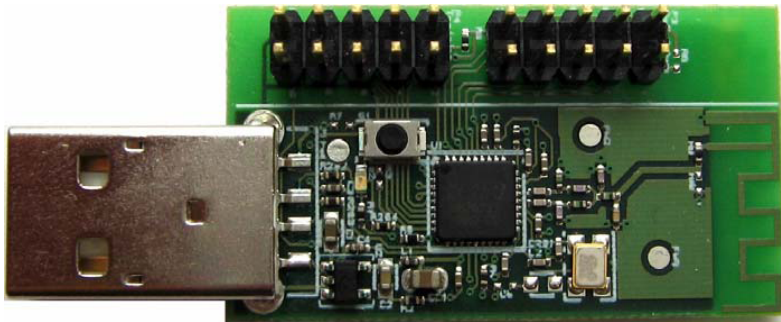


Figura 6.2.1- Antena Chipcon inserida em uma PCB [14].

A Figura 6.2.2 mostra as dimensões da antena em questão.

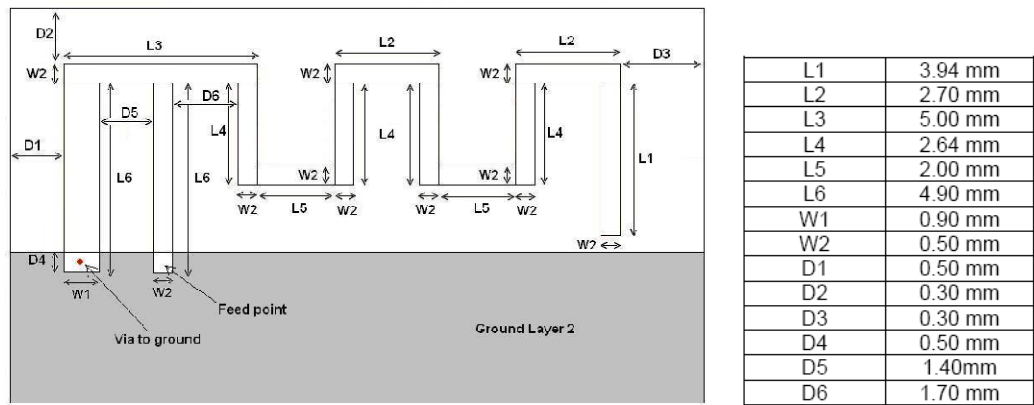


Figura 6.2.2 – Dimensões da Antena Chipcon [14].

A Figura 6.2.3 indica como a estrutura foi produzida no software. O background em que a estrutura foi inserida está em detalhe na Figura 6.2.3 (a) e a geometria da antena está mostrada em detalhe na Figura 6.2.3 (b). Foram consideradas as necessidades estabelecidas no capítulo 3 para que a simulação fosse confiável. Os gráficos disponibilizados na nota de aplicação servirão para validação da utilização do software.



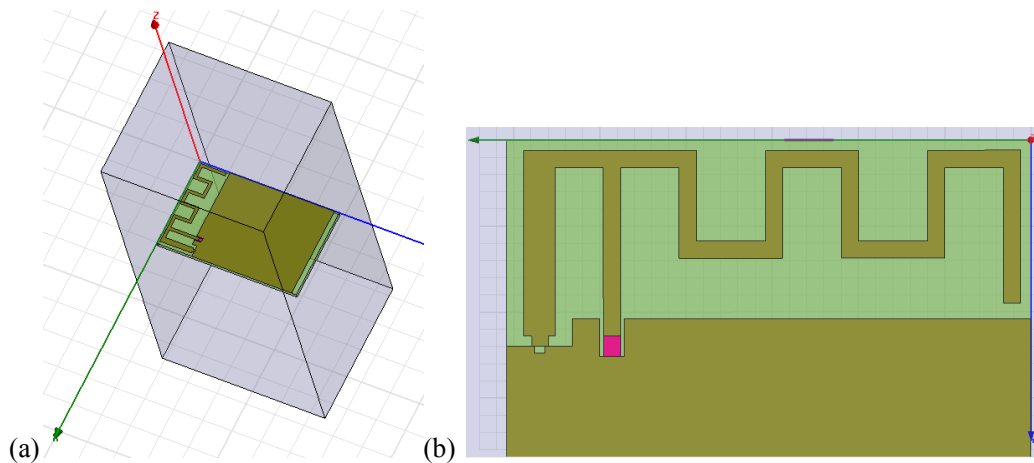


Figura 6.2.3 – Detalhe da simulação Chipcon, PCB inserida em ambiente de ar onde é aplicado a radiação (a) e detalhe da excitação (rosa) e o local em que a antena é ligada ao terra.

A nota de aplicação disponibilizada pela Chipcon não fornece gráficos que comprovem que a impedância da antena seja 50ohms e nem fornece um gráfico que comprova VSWR menor que 2 para toda faixa de frequência utilizada. Assim, foi necessário uma simulação da antena para comprovação das promessas feitas pela Chipcon.

A figura 6.2.4 mostra a impedância real e imaginária obtida pela simulação.

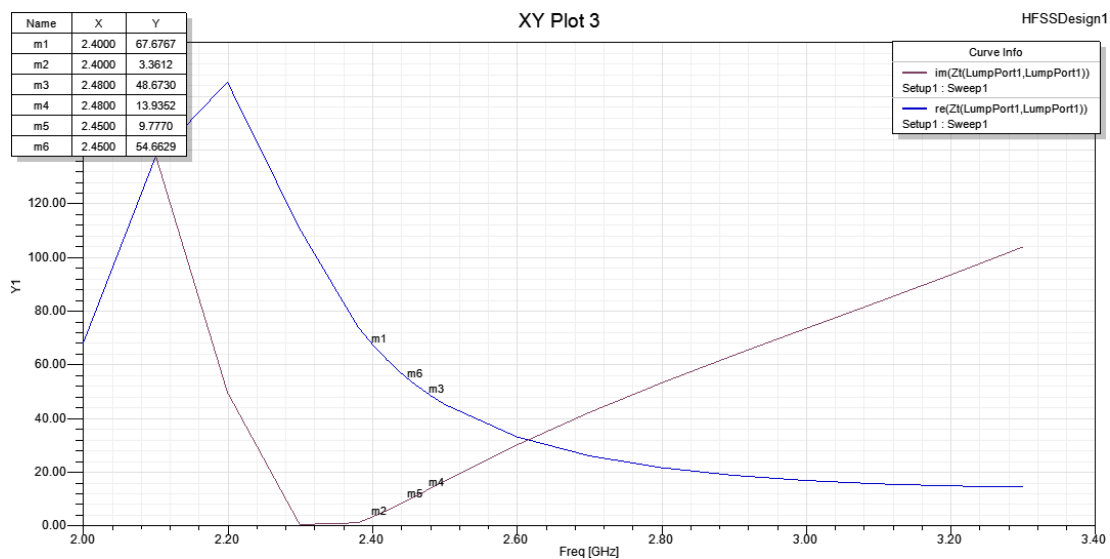


Figura 6.2.4- Variação da impedância da antena Chipcon simulado, mostrado na forma retangular.

Para frequência de 2,4GHz a impedância obtida pela simulação foi de 67,67+j3,3612ohms . Na frequência central de 2,45GHz a impedância obtida pela simulação foi

de  $54,6629+j9,7770\text{ohms}$ . No extremo superior da frequência que o sistema abrange, 2,48GHz, a impedância obtida foi de  $48,6730+j13,9352\text{ohms}$ .

A Figura 6.2.5 mostra o VSWR simulado para uma fonte de 50ohms ligada ao terminal da antena.

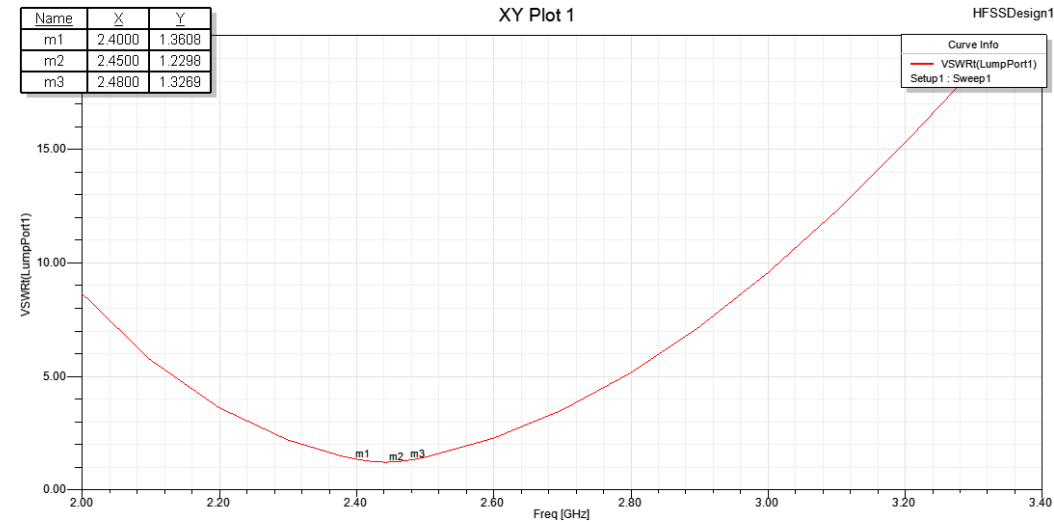


Figura 6.2.5 – VSWR simulado Chipcon.

Para a frequência de 2,4GHz o VSWR simulado foi de 1,3608, já para a frequência central de 2,45GHz foi de 1,2298 e para a frequência de 2,4800 foi de 1,3269. Com a análise dos resultados de VSWR obtidos é possível perceber que os resultados simulados estão dentro do prometido pelo fabricante.

Foram disponibilizados na nota de aplicação os diagramas de radiação horizontal e vertical da antena em questão. A Figura 6.2.6 e a Figura 6.2.7 mostram respectivamente o diagrama de radiação horizontal disponibilizado na nota e o diagrama de radiação horizontal obtido na simulação. Pode ser observada uma grande semelhança entre os diagramas, o diagrama simulado foi normalizado para que a escala fosse igual a do diagrama medido.

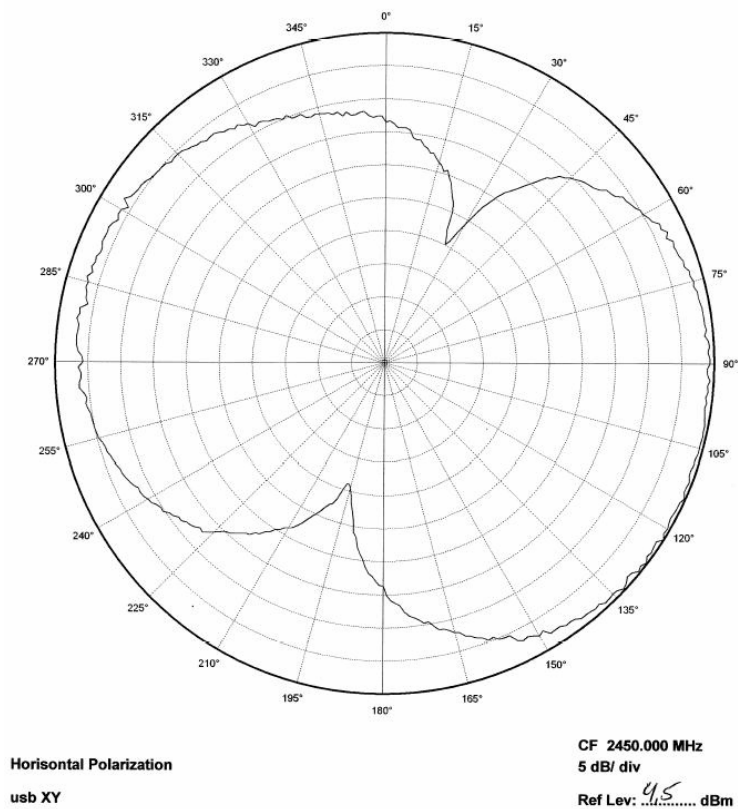


Figura 6.2.6 – Diagrama de radiação horizontal disponibilizado na nota Chipcon.

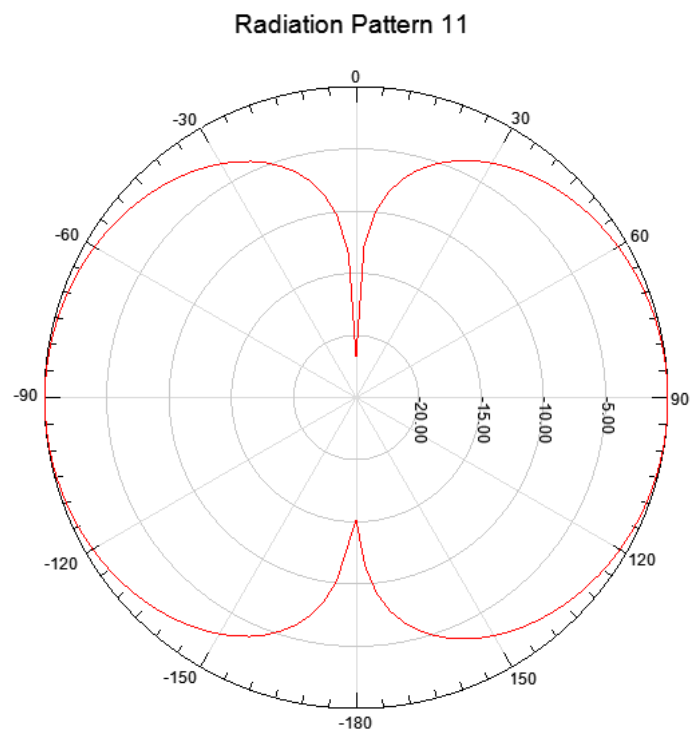


Figura 6.2.7 – Diagrama de radiação horizontal simulado para antena Chipcon.

A Figura 6.2.8 mostra o diagrama vertical disponibilizado pela Chipcon. A Figura 6.2.9 mostra o diagrama vertical simulado no Software.

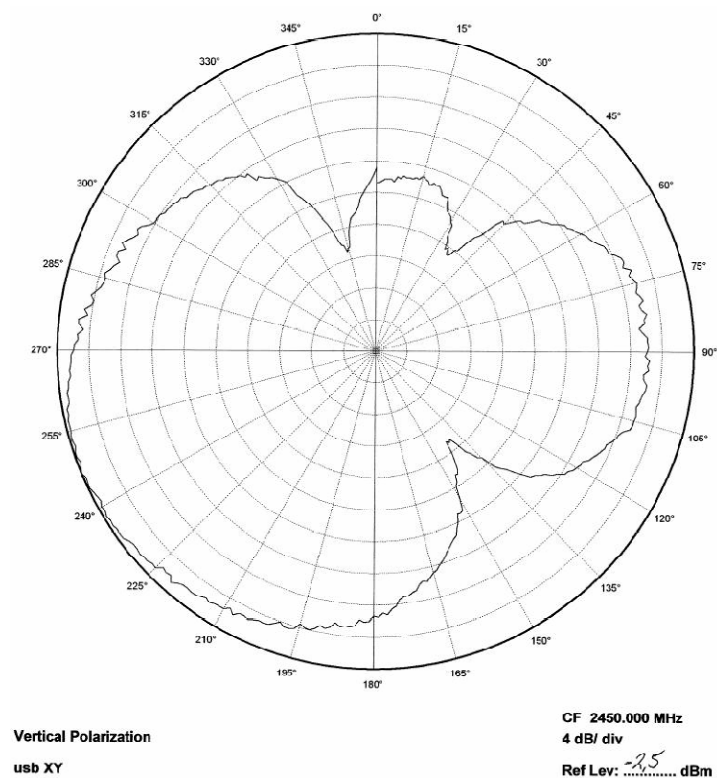


Figura 6.2.8 – Diagrama de radiação vertical fornecido na nota Chipcon.

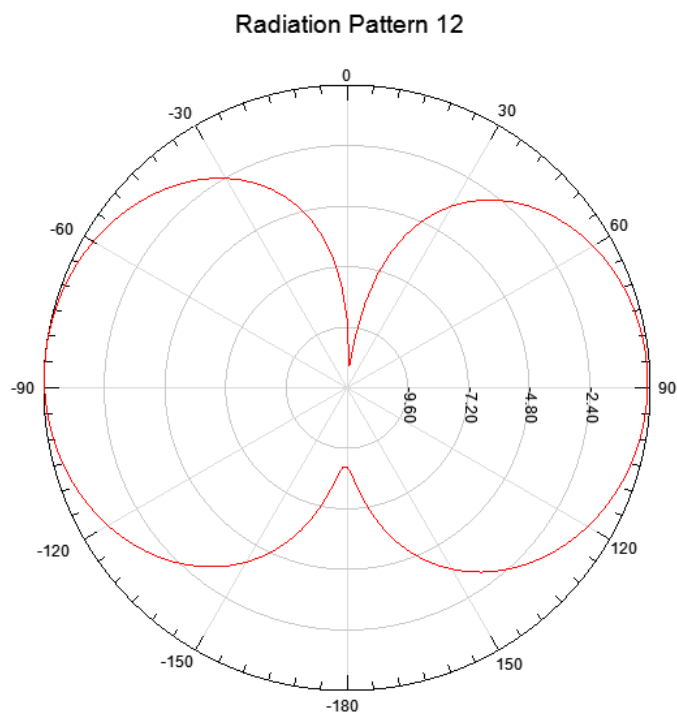


Figura 6.2.9- Diagrama de radiação vertical simulado para antena Chipcon.

É possível observar uma leve diferença entre os valores obtidos da nota e o simulado para radiação, o lóbulo da parte direita do diagrama não está simétrico para o diagrama fornecido e está simétrico para o diagrama simulado. Para efeito de caracterização da antena será levado em consideração o diagrama disponibilizado na nota de aplicação.

A figura 6.2.10 mostra o diagrama de radiação 3D da estrutura simulada.

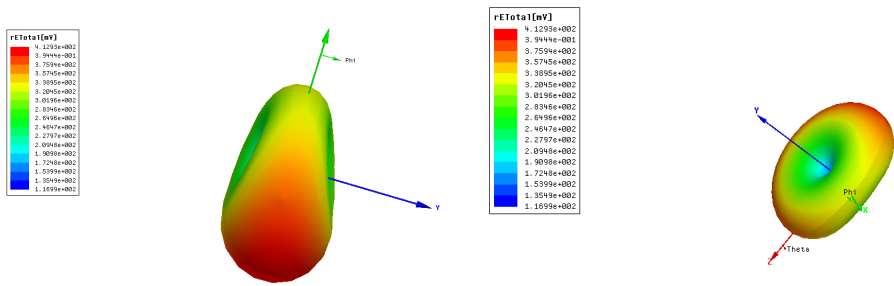


Figura 6.2.10 – Diagramas de radiação 3D Chipcon.

Com os diagramas de radiação apresentados anteriormente é possível caracterizar a antena como sendo onidirecional, porém com algumas imperfeições.

Diante das características da antena tratada, é possível representar suas características pela tabela 4.

	Chipcon - AN043	Observações
Frequência Central	2,45GHz	
Dimensões	5,4x14,4 mm = 77,76mm <sup>2</sup>	
Impedância de entrada	54,6629+j9,7770ohms	Para 2,450GHz
VSWR	1,306(2,4GHz) 1,2298(2,45GHz) 1,3269(2,48GHz)	Simulado no software
Diagrama de Radiação	Onidirecional	Com imperfeições
Custo	0	

Tabela 4 – Caracterização da antena disponibilizada pela Chipcon na nota AN043.

### 6.3 – Antenna Factor

A Linx Technologies proporciona soluções simples para tecnologia *wireless*. Antenna Factor é uma subdivisão da Linx que é responsável pela fabricação de antenas. Esta subdivisão da Linx fabrica antenas do tipo chip SMD para a frequência de 2,4GHz. Todas as figuras mostradas neste item do capítulo 6 foram retiradas da referência [15].

O tamanho da antena da marca Linx possui um tamanho bem satisfatório, como mostrado na figura 6.3.1:

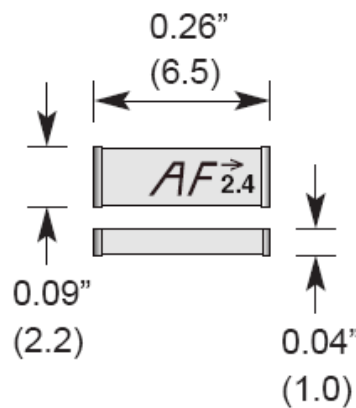


Figura 6.3.1- Dimensões, antena chip – Antenna Factor.

O datasheet disponibilizado pelo fabricante possui informações sobre a antena. A figura 6.3.2 representa o VSWR.

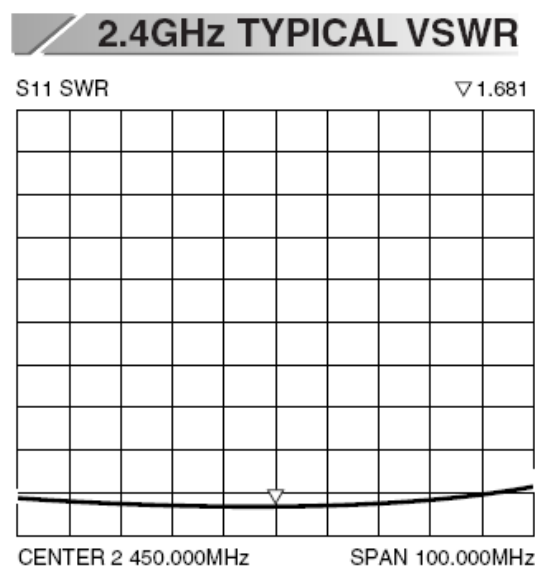
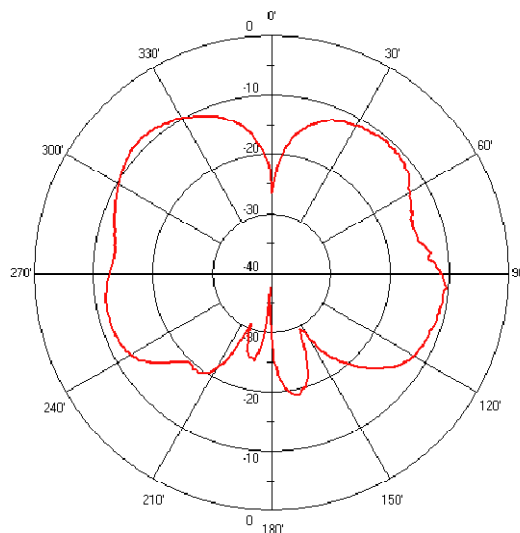


Figura 6.3.2 – VSWR, antena chip - Antenna Factor.

Outra informação disponibilizada pelo fabricante é o diagrama de radiação vertical da antena representado pela figura 6.3.3.



O diagrama de radiação horizontal é mostrado na figura 6.3.4.

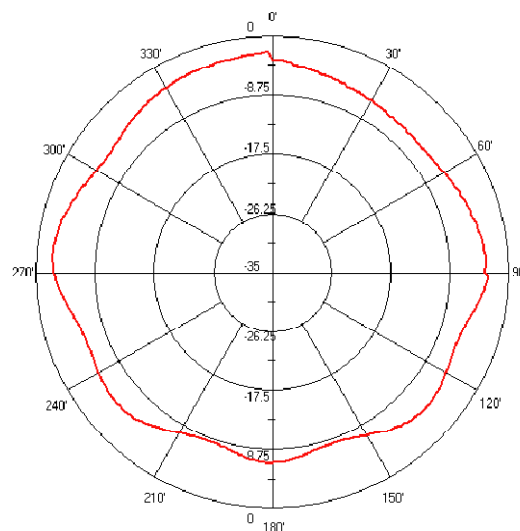


Figura 6.3.4- Diagrama de radiação horizontal – Antenna Factor.

Pelos diagramas de radiação representados nas figuras acima, é possível observar a característica de radiação onidirecional da antena em questão, porém com imperfeições.

Para verificação de preço foi consultado a distribuidora Digikey [17], e o preço foi de U\$1,51 a unidade.

Com os dados fornecidos pelo fabricante é possível representar as características desta antena pela tabela 5.

	ANT-2.45-CHPCT - Linx Technologies	Observações
Frequência Central	2,45GHz	
Dimensões	6.5mm x 2.2mm = 14,3mm <sup>2</sup>	Sem considerar área ao redor necessária
Impedância de entrada	50 ohms	
VSWR	1,681 (2,450GHz)	
Diagrama de Radiação	onidirecional	muitas imperfeições
Custo	U\$1,51	www.digikey.com

Tabela 5 – Caracterização da Antena chip SMD da marca Antenna Factor



## 6.4 – Yageo

As antenas chip SMD da Yageo [16] são facilmente disponibilizadas para compra em sites de fornecedores de componentes eletrônicos. A seguir serão mostradas as características do modelo de antena Yageo-311-1226-2. Os parâmetros, bem como os gráficos, foram adquiridos do datasheet disponibilizado no site da Digikey [17].

A Figura 6.4.1 representa a sugestão de PCB para a inserção da antena em questão. Os dados obtidos do datasheet foram medidos de um protótipo que seguiu as dimensões especificadas na Figura 6.4.1. O tamanho da antena chip está na Tabela 6 no fim deste item.

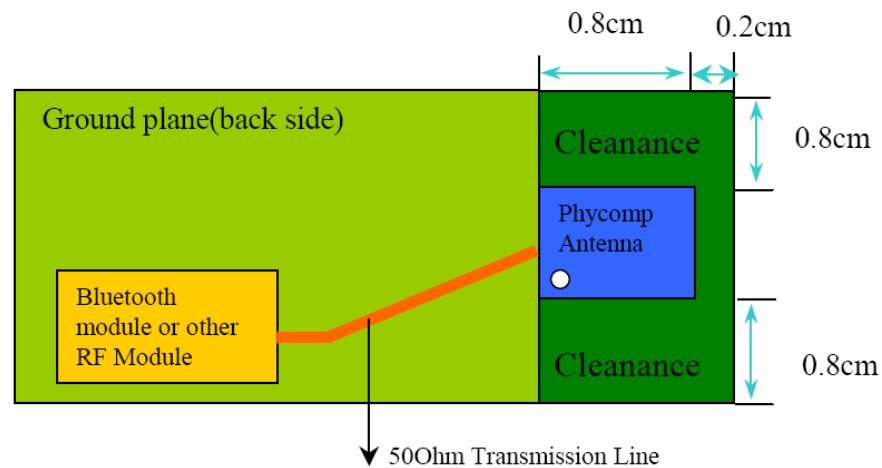


Figura 6.4.1 – Dimensões de PCB sugerido pelo fabricante.

O fabricante disponibiliza no datasheet uma figura (Figura 6.4.2) em que estão contidas as informações sobre a impedância e o VSWR da antena em questão.

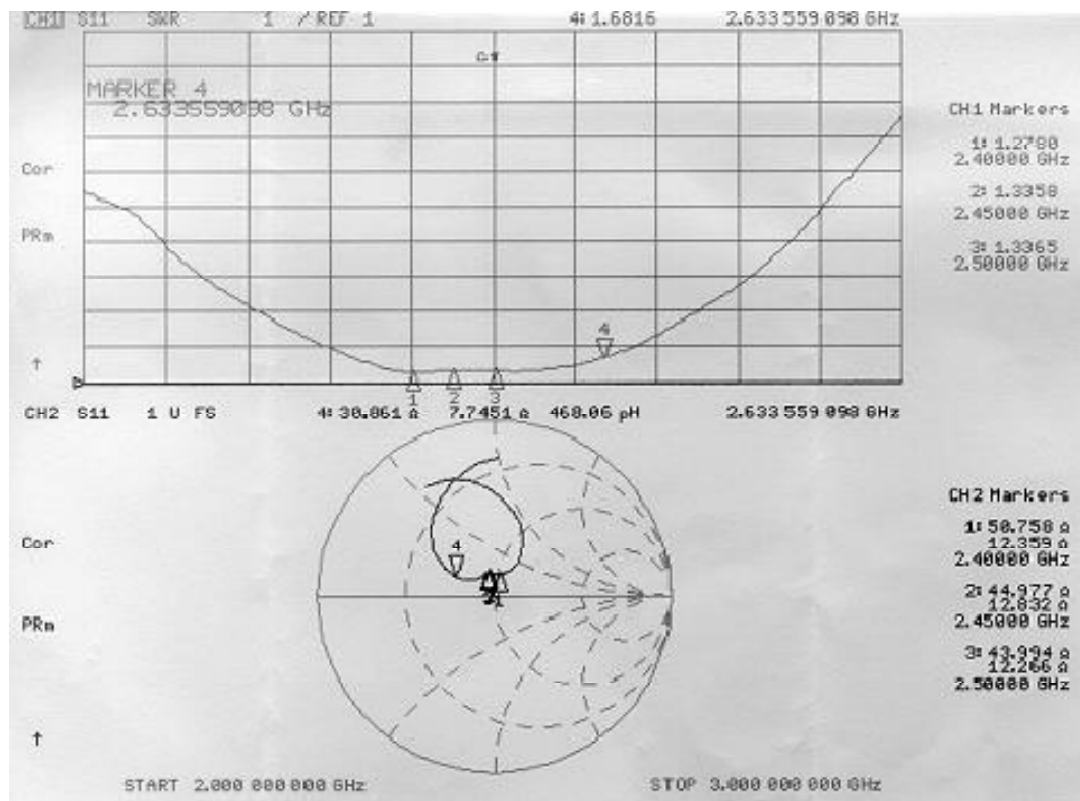


Figura 6.4.2 – VSWR e impedância da antena chip da marca Yageo.

É possível observar que o VSWR medido para a frequência central de 2,450GHz é de 1,3350. Para as frequências de 2,4GHz e 2,5GHz foram medidos 1,278 e 1,3365 respectivamente.

A impedância da antena medida para a frequência central de 2,45GHz foi de 44,977+j12,832 ohms. Para as frequências de 2,4GHz e 2,5GHz foram medidos 50,758+j12,359 ohms e 43,994+j12,266 ohms respectivamente.

Os diagramas de radiação vertical e horizontal estão representados na Figura 6.4.3.

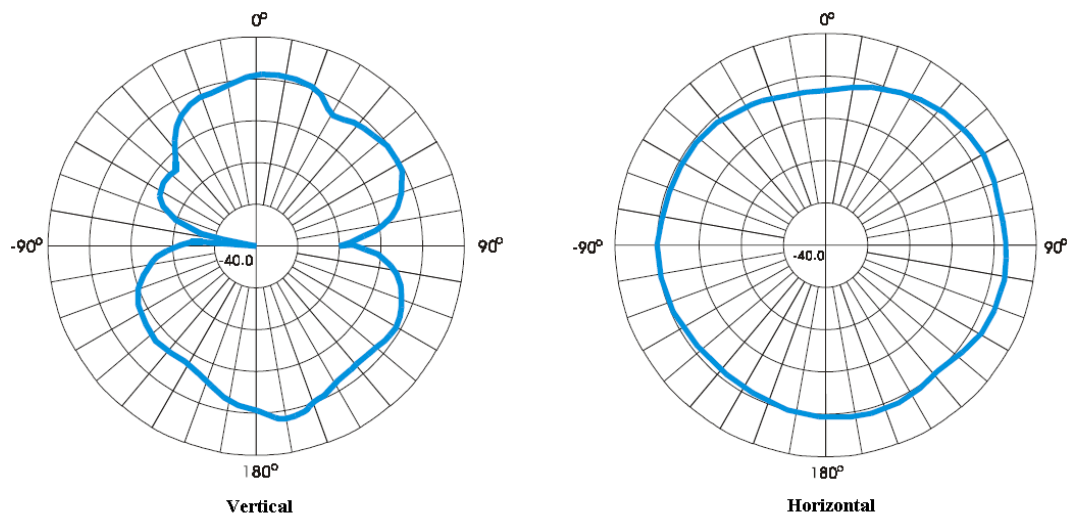


Figura 6.4.3 – Diagramas de radiação vertical e horizontal da antena chip SMD da Yageo.

Diante dos diagramas de radiação da antena em questão é possível observar a característica de radiação onidirecional da antena em questão, porém são observadas algumas imperfeições.

O preço da antena foi avaliado pelo mesmo site consultado para antena analisada anteriormente, e o preço por unidade foi de US\$2,60 [17].

As características da antena em questão são representadas na tabela 6.

	Yageo-311-1226-2	Observações
Frequência Central	2,45GHz	
Dimensões	5,5mm x 7,35mm = 40,425mm <sup>2</sup>	Sem considerar área ao redor necessária
Impedância de entrada	50 ohms	
VSWR	1,278(2,4GHz) 1,335(2,450GHz) 1,3365(2,5GHz)	
Diagrama de Radiação	Onidirecional	Com imperfeições
Custo	US 2,60	www.digikey.com

Tabela 6 – Características da antena chip SMD da marca Yageo.

## 7-Escolha da Antena

Considerando todos os caminhos possíveis de serem seguidos, a decisão da antena deverá levar em conta os requisitos que são mais importantes para o projeto.

Diante dos diagramas de radiação de todas as antenas analisadas terem imperfeições, mas mesmo assim a maioria serem considerados como onidirecionais, a escolha passou a ser mais decisiva considerando os outros parâmetros analisados.

Para a escolha foi associado à antena atualmente utilizada no produto MOOVI nota 5 em todos os quesitos. Para as outras antenas foi associado valor 4 no caso do valor do parâmetro analisado ser pior que a antena atual, valor 5 no caso do parâmetro ser igual ou valor 6 no caso de ser melhor. A soma dos valores atribuídos para cada parâmetro dá o resultado para cada antena.

	Moovi atual	Microchip	Chipcon	Antenna Factor	Yageo
Dimensões	5	4	6	6	6
Impedância de entrada	5	6	6	6	6
VSWR	5	6	6	4	6
Diagrama de Radiação	5	5	6	6	6
Custo	5	6	6	4	4
Resultado	<b>25</b>	<b>27</b>	<b>30</b>	<b>26</b>	<b>28</b>

Tabela 7 - Comparação entre os resultados obtidos.

Pela tabela produzida a antena que tem mais características para se encaixar ao projeto, é a antena disponibilizada na nota de aplicação da Chipcon.

É importante ressaltar que diante da proximidade da maioria dos parâmetros analisados, a dimensão da antena e o custo foram fatores decisivos para que a antena da Chipcon tivesse maior pontuação.

## 8-Conclusão

A antena escolhida é muito interessante, pois se trata de uma antena tipo F invertida com dimensões satisfatoriamente pequenas. A estrutura se encaixa no requisito de projeto em que a antena deveria preferencialmente ter área menor  $80\text{mm}^2$ .

As técnicas aplicadas nas antenas tipo F invertido (capítulo 4, item 4.3 deste trabalho) possibilitam à antena uma impedância de entrada muito próxima da desejada 50 ohms. Esta proximidade pode ser verificada pelo VSWR, que não ultrapassou o valor de 1,35, imposto como requisito de projeto.

O diagrama de radiação não foi um fator determinante para a escolha diante das alternativas, porém o diagrama de radiação da antena escolhida é o com menos imperfeições, ou seja, mais próximo do onidirecional do que as outras antenas.

O grande triunfo desse estudo foi conseguir uma antena impressa com características tão satisfatórias quanto antenas tipo chip SMD, pois a antena impressa tem custo zero e as antenas tipo SMD tem custo que chega a ultrapassar US\$1,00.

O contato com o software HFSS proporcionou que o estudo tivesse dados para a análise quando alguns parâmetros necessários não foram disponibilizados pelos fabricantes.

## 9-Referências Bibliográficas

- [1] Kraus, John D. – *Antennas / John D. Kraus*; tradução : Paulo Antônio Mariotto – Rio de Janeiro : Ed. Guanabara Dois, 1983.
- [2] Esteves, Luiz Claudio - *Antenas: Teoria Básica e Aplicações* , São Paulo : McGraw-Hill do Brasil, 1980.
- [3] Bahl, I. J. e Bhartia, P. - *Microwave Solid State Circuit Design* - Willey Interscience, 1988.
- [4] Fleming, W. J. e Galvão, B. S. M. C. – *Projetos de alta frequência e antenas auxiliados por microcomputadores*, São Paulo: McGraw-Hill, 1987
- [5] Fusco, Vincent F. – *Teoria e técnicas de antenas : princípios e prática* ; tradução: José Lucimar do Nascimento – Porto Alegre : Bookman, 2006.
- [6] Blake L. V. – *Antennas* – ARTECH HOUSE, INC , 1984.
- [7] Escola de Engenharia de São Carlos - Disciplinas online – Antenas  
<http://www.sel.eesc.usp.br/informatica> - (10/2008)
- [8] Engenharia Elétrica PUC-RS - <http://www.ee.pucrs.br/~decastro/download.html> - (10/2008)
- [9] Escola Técnica de Brasília – Material Didático Para Professores – Tutorial de Rádio Enlace  
[http://www.etb.com.br/professor/materialdeapoio/tut\\_radio.pdf](http://www.etb.com.br/professor/materialdeapoio/tut_radio.pdf) - (10/2008)
- [10] Departamento de Engenharia Eletrônica, Telecomunicações e Computação – Lisboa – Portugal  
[http://www.deetc.isel.ipl.pt/sistemastele/Pr1/Arquivo/Sebenta/Linhas/I\\_Introdu%C3%A7%C3%A3o.pdf](http://www.deetc.isel.ipl.pt/sistemastele/Pr1/Arquivo/Sebenta/Linhas/I_Introdu%C3%A7%C3%A3o.pdf) - (10/2008)
- [11] HFSS 10.0, Ansoft Coporation. Material de divulgação disponível em:  
<http://www.ansoft.com/products/hf/hfss/> - (08/2008)
- [12] Lytel, Allan – *abc das ANTENAS* ; tradução : Roberto A. B. Padilha – Rio de Janeiro: Antenna Empresa Jornalística S.A. ,1973.

[13] [www.microchip.com](http://www.microchip.com) (03/2008)

[14] <http://focus.ti.com/general/docs/techdocsabstract.tsp?abstractName=swra117d> (03/2008)

[15] <http://www.linxtechnologies.com/Products/Antennas/Embeddable/CHP-Series-Chip-Antennas> - (10/2008)

[16] [www.yageo.com](http://www.yageo.com) - (10/2008)

[17] [www.digikey.com](http://www.digikey.com) - (10/2008)