



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
DE MINAS GERAIS – CEFET/MG**
DEPARTAMENTO DE ENSINO SUPERIOR - DES
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA ELÉTRICA - DAEE
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA - CEIE

TRABALHO DE GRADUAÇÃO I - TGI

MODELAGEM ELETROMAGNÉTICA DE ANTENAS CORNETA PIRAMIDAIS

Aluno: Rafael Silva Alípio

Orientador: Úrsula do Carmo Resende

Co-orientador: Marco Aurélio de Oliveira Schroeder

Belo Horizonte, 27 de março de 2007



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
DE MINAS GERAIS – CEFET/MG**

DEPARTAMENTO DE ENSINO SUPERIOR - DES
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA ELÉTRICA - DAEE
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA - CEIE

TRABALHO DE GRADUAÇÃO I - TGI

Modelagem Eletromagnética de Antenas Corneta Piramidais

por

Rafael Silva Alípio

Texto do Relatório Técnico do Trabalho de Graduação I submetido à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Engenharia Industrial Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção de créditos equivalentes a uma disciplina optativa.

Ênfase: SEP, SEI ou SET

Orientador: Úrsula do Carmo Resende

Co-orientador: Marco Aurélio de Oliveira Schroeder

Belo Horizonte, 27 de março de 2007



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
DE MINAS GERAIS – CEFET/MG**

DEPARTAMENTO DE ENSINO SUPERIOR - DES
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA ELÉTRICA - DAEE
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA - CEIE

Rafael Silva Alípio

Modelagem Eletromagnética de Antenas Corneta Piramidais

Belo Horizonte, Julho, 2005.

Relatório do trabalho de graduação TG I apresentado ao Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais

“Modelagem Eletromagnética de Antenas Cornetas Piramidais”

Rafael Silva Alípio

Texto do Relatório Técnico do Trabalho de Graduação I submetido à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Engenharia Industrial Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção de créditos equivalentes a uma disciplina optativa.

Aprovada em 03 de abril de 2007.

Por:

Úrsula do Carmo Resende – Mestre
Prof. DAEE / CEFET-MG – Orientador

Marco Aurélio de Oliveira Schroeder – Doutor
Prof. DAEE / CEFET-MG – Co-orientador

Tarcísio Antônio Santos de Oliveira – Doutor
Prof. DAEE/CEFET-MG

Márcio Matias Afonso – Doutor
Prof. DAEE / CEFET-MG

Aos meus pais, Cleides e Ilza.

AGRADECIMENTOS

Ao CEFET por mais uma vez ter me proporcionado evoluir profissional e academicamente.

À professora orientadora Úrsula do Carmo Resende por toda paciência, apoio e contribuições durante o trabalho.

Ao professor co-orientador Marco Aurélio de Oliveira Schoroeder por todo incentivo, ajuda e sugestões.

Ao amigo Cláudio Henrique Gomes Santos por todas sugestões e ajuda neste trabalho.

À minha namorada Mirelle Karoline pela inestimável ajuda nos textos, compreensão e estímulo.

A todos que direta ou indiretamente ajudaram na elaboração deste trabalho.

“Nada é impossível no mundo para quem se atreve a escalar as alturas”

Presidente Mao Tsetung

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	ii
SUMÁRIO	iii
RESUMO	v
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	viii
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 – Relevância do tema em investigação	1
1.2 – Objetivos do Trabalho	2
1.3 – Organização do Texto.....	3
CAPÍTULO 2 - ANTENAS CORNETA: UMA VISÃO GERAL	4
2.1 – Introdução.....	4
2.2 – Tipos de corneta e seus usos.....	4
2.3 – Breve Histórico.....	5
2.4 – Principais aplicações na atualidade	6
CAPÍTULO 3 - EQUAÇÕES DE CAMPO	7
3.1 – Introdução.....	7
3.2 – Equações de Maxwell	7
3.3 – Dualidade e carga magnética	9
3.4 – Vetores potenciais auxiliares	10
3.5 – Radiação de campo de campo distante.....	11

3.6 – Campos irradiados por uma abertura.....	13
---	----

CAPÍTULO 4 - MODELO FÍSICO E MATEMÁTICO DE UMA ANTENA CORNETA PIRAMIDAL 16

4.1 – Introdução.....	16
4.2 – Princípio da equivalência.....	16
4.3 – Corneta piramidal.....	17
4.3.1 – Problema equivalente	19
4.3.2 – Campos irradiados.....	21
4.4 – Análises físicas	27
4.4.1 – Análises físicas - Plano H	27
4.4.2 – Análises físicas - Plano E	33
4.4.3 – Diretividade.....	35
4.4.4 – Resposta em frequência.....	38
4.5 – Conclusões.....	40

CAPÍTULO 5 - SIMULAÇÕES E COMPARAÇÕES COM ANTENAS CORNETAS PIRAMIDAIAS REAIS 41

5.1 – Introdução.....	41
5.2 – Antena corneta piramidal modelo EMCO – 3160	41
5.2.1 – Simulações e comparações.....	42
5.2.2 – Análise dos resultados.....	45
5.3 – Antena corneta piramidal de faixa larga modelo ETS – 3106 com duplo cume	46
5.3.1 – Simulações e comparações.....	47
5.3.2 – Análise dos resultados.....	50
5.4 – Conclusões.....	52

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES 53

6.1 – Introdução.....	53
6.2 – Resultados alcançados	53
6.3 – Propostas de continuidade.....	56

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 57

RESUMO

O grande desenvolvimento imposto pelos avanços tecnológicos, proporcionados pela eletrônica (analógica/digital), fez com que a suportabilidade elétrica dos equipamentos eletro-eletrônicos reduzisse bastante, estando, portanto, mais susceptíveis à interferência eletromagnética de agentes externos, como por exemplo, as descargas atmosféricas e ondas eletromagnéticas em geral (celular, radio, etc.). A compreensão dos problemas relativos à interferência entre equipamentos elétricos e eletrônicos é de fundamental importância para se garantir o correto funcionamento dos mesmos. Como exemplos, nos carros e aeronaves a eletrônica embarcada é muito grande e o mau funcionamento de qualquer sistema pode ter um efeito desastroso; por isso os cuidados e estudos referentes a estes fenômenos são minuciosos.

As antenas corneta são tradicionalmente utilizadas em ensaios de compatibilidade eletromagnética (CEM) devido principalmente a algumas características como construção simples, ótima diretividade e larga banda de frequência. Assim, a avaliação do comportamento dos campos irradiados pela mesma é fundamental para execução e planejamento dos ensaios.

O presente trabalho propõe a elaboração de ferramentas analíticas e computacionais para avaliação dos campos irradiados por uma antena corneta piramidal e posterior comparação com dados fornecidos por fabricantes e resultados obtidos por outros autores. O trabalho servirá de base para outros trabalhos futuros na avaliação da interferência dos campos eletromagnéticos no funcionamento de aparelhos eletrônicos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Configurações típicas de antenas corneta (fonte: <i>Antenna theory: analysis and design, Third Edition</i> [4])	5
Figura 3.1 – Abertura e sistema de coordenadas (fonte: <i>Antenna theory: analysis and design, Third Edition</i> [4])	13
Figura 4.1 – Problema original e equivalente	16
Figura 4.2 – Corneta piramidal e sistemas de coordenadas (fonte: <i>Antenna theory: analysis and design, Third Edition</i> [4])	18
Figura 4.3 – Problema equivalente	19
Figura 4.4 – Diagrama de campo - Plano H	28
Figura 4.5 – Diagramas de radiação típicos da corneta no plano H para ângulo de abertura $2\psi_h = 20^\circ$ fixo e comprimento da corneta variável	29
Figura 4.6 – Diagramas de radiação típicos da corneta no plano H para comprimento da corneta constante $\frac{\rho_2}{\lambda} = 4$ e ângulo de abertura $2\psi_h$ variável	30
Figura 4.7 – Diferença entre a frente de fase e o plano da abertura	31
Figura 4.8 – Ângulo do feixe X ângulo de abertura para corneta piramidal no plano H	31
Figura 4.9 – Diagrama de campo - Plano E	33
Figura 4.10 – Diagramas de radiação típicos da corneta no plano E para ângulo de abertura $2\psi_e = 20^\circ$ fixo e comprimento da corneta variável	34
Figura 4.11 – Diagramas de radiação típicos da corneta no plano E para comprimento da corneta constante $\frac{\rho_2}{\lambda} = 4$ e ângulo de abertura $2\psi_e$ variável	35
Figura 4.12 – G_H em função de A (fonte: <i>Antenna theory: analysis and design, Third Edition</i> [4])	37
Figura 4.13 – G_E em função de B (fonte: <i>Antenna theory: analysis and design, Third Edition</i> [4])	38
Figura 4.14 – Resposta em frequência da antena corneta	39
Figura 4.15 – Diagramas de radiação 3D para antena comercial ETS – 3106 (fonte: software EMQuest™ Viewer disponível no site do fabricante [24])	40
Figura 5.1 – Série EMCO – 3160 (fonte: manual do fabricante [24])	42
Figura 5.2 – Diagramas de radiação do modelo 3160-01 para $f = 1,2GHz$ (fonte: manual do fabricante [24])	43
Figura 5.3 – Diagramas de radiação do modelo 3160-01 para $f = 1,2GHz$ (fonte: simulação)	43
Figura 5.4 – Diagramas de radiação do modelo 3160-04 para $f = 3,3GHz$ (fonte: manual do fabricante)	44

Figura 5.5 – Diagramas de radiação do modelo 3160-04 para $f = 3,3GHz$ (fonte: simulação)	44
Figura 5.6 – Diagramas de radiação do modelo 3160-09 para $f = 22GHz$ (fonte: manual do fabricante)	45
Figura 5.7 – Diagramas de radiação do modelo 3160-09 para $f = 22GHz$ (fonte: simulação)	45
Figura 5.8 – Antena corneta piramidal modelo ETS - 3106 (fonte: manual do fabricante [24])	46
Figura 5.9 – Diagrama de radiação do Plano E da corneta para $f = 400MHz$	48
Figura 5.10 – Diagrama de radiação do Plano H da corneta para $f = 400MHz$	48
Figura 5.11 – Diagrama de radiação do Plano E da corneta para $f = 800MHz$	48
Figura 5.12 – Diagrama de radiação do Plano E da corneta para $f = 1GHz$	49
Figura 5.13 – Diagrama de radiação do Plano H da corneta para $f = 1GHz$	49
Figura 5.14 – Diagrama de radiação do Plano E da corneta para $f = 1,5GHz$	49
Figura 5.15 – Diagrama de radiação do Plano E da corneta para $f = 2GHz$	50
Figura 5.16 – Diagramas de radiação 3D para antena ETS – 3106 (fonte: software EMQuest™ Viewer disponível no site do fabricante [24])	51
Figura 5.17 - Diagrama de radiação para $\phi = 45^\circ$ da corneta para $f = 2GHz$	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dimensões das antenas da série EMCO – 3160	42
---	----

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 – Relevância do tema em investigação

Todo equipamento é submetido a diversas perturbações eletromagnéticas e é naturalmente um gerador de perturbação eletromagnética. Essas perturbações são geradas basicamente devido a variações bruscas de grandezas elétricas como tensão e corrente. Tais perturbações podem propagar-se por condução ao longo dos fios e cabos ou por radiação sob a forma de ondas eletromagnéticas. Essas ondas eletromagnéticas geram fenômenos indesejáveis como a perturbação nas ondas de rádio e as interferências nas emissões radioelétricas dos sistemas de controle.

Nos últimos anos, vários fatores contribuíram para aumentar a importância dos estudos no campo da compatibilidade eletromagnética (CEM). As perturbações são cada vez mais relevantes, pois os níveis de tensão e corrente vêm aumentando. Além disso, os circuitos eletrônicos são cada vez mais sensíveis e a vulnerabilidade desses em relação aos circuitos perturbadores está cada vez maior. Dessa forma, a CEM tornou-se um critério fundamental a ser considerado em todas as fases de desenvolvimento e fabricação dos produtos, inclusive nas fases de instalação e de cabeamento. Atualmente a CEM é considerada também nas normas e torna-se um requisito legal [1].

As antenas são equipamentos de fundamental importância na realização de ensaios de CEM. Essas são utilizadas devido à sua capacidade de irradiar ondas eletromagnéticas de diversas formas e frequências simulando uma possível fonte de interferência eletromagnética. Nesse sentido, uma completa avaliação das características eletromagnéticas das antenas utilizadas em ensaios de CEM, é fundamental para que se conheçam os efeitos da interação dos campos irradiados com o ambiente eletromagnético e dispositivos à sua volta.

As antenas corneta são tradicionalmente utilizadas em ensaios de CEM devido principalmente a algumas características como construção simples, ótima diretividade e larga banda de frequência. Os diagramas de radiação das antenas cornetas podem ser avaliados experimentalmente, contudo a implementação numérica para obtenção dos mesmos é de fundamental importância para realização de simulações e planejamento de ensaios de CEM. Entretanto, a implementação numérica requer métodos computacionais avançados, empregados, por exemplo, em softwares como o

Mathematica [15], já que as equações de campo da antena corneta geralmente não possuem solução analítica. Vários trabalhos vêm sendo publicados a fim de caracterizar os campos irradiados e reproduzi-los computacionalmente. Alguns dos métodos utilizados pelos pesquisadores são o método dos momentos [2] e softwares de simulações baseados no método dos elementos finitos [3].

Com base no exposto acima torna-se evidente a necessidade de estudo e desenvolvimento de uma ferramenta computacional para avaliação dos campos irradiados por antenas cornetas. Esta ferramenta servirá de base para outros trabalhos futuros auxiliando na avaliação da interferência dos campos eletromagnéticos no funcionamento de aparelhos eletrônicos e em ensaios de CEM.

1.2 – Objetivos do Trabalho

A implementação computacional dos campos irradiados por uma antena corneta requer inicialmente um completo entendimento da teoria eletromagnética em altas frequências bem como o estudo de algumas técnicas numéricas, visto que muitas das equações de campo das antenas não possuem solução analítica. Assim, o estudo de métodos numéricos eficientes é hoje objeto de pesquisa de diversos estudiosos da área de compatibilidade eletromagnética.

O objetivo principal deste trabalho consiste no desenvolvimento de um modelo eletromagnético para avaliação de uma antena corneta piramidal. Com base nesse modelo as equações de campo foram obtidas e implementadas em um algoritmo computacionalmente utilizando o ambiente MATLAB®. A partir do algoritmo computacional desenvolvido, os diagramas de irradiação da antena são plotados e os campos calculados. Para validação do algoritmo, os resultados obtidos são comparados com dados experimentais e estudos disponíveis na literatura especializada. Para alcançar os objetivos acima as atividades correspondentes foram divididas basicamente nos seguintes tópicos:

- Estudo da teoria eletromagnética em altas frequências;
- Estudo das técnicas numéricas a serem utilizadas na solução das equações de campo da antena corneta piramidal;
- Implementação computacional das soluções das equações de campo;
- Validação do algoritmo por meio de comparações com dados experimentais.

1.3 – Organização do Texto

Este trabalho está organizado em seis capítulos, incluindo este capítulo introdutório.

No capítulo 2, após a presente introdução, apresenta-se uma breve descrição das antenas cornetas, destacando suas aplicações.

No capítulo 3 é apresentada a teoria eletromagnética de alta frequência que é utilizada no desenvolvimento e cálculo das equações de campo da antena corneta.

No capítulo 4 as equações de campo são deduzidas e implementadas em um algoritmo computacional. Neste capítulo é apresentada uma ampla análise física da antena corneta piramidal por meio de simulações utilizando o algoritmo desenvolvido.

No capítulo 5 são apresentadas comparações entre diagramas de radiação reais fornecidos por fabricantes e diagramas simulados por meio do algoritmo.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões deste trabalho e algumas propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 - ANTENAS CORNETA: UMA VISÃO GERAL

2.1 – Introdução

O objetivo deste capítulo é apresentar uma breve descrição das antenas cornetas, destacando suas aplicações. Inicialmente são expostos os principais tipos de antenas cornetas juntamente com suas características e aplicações. A seguir é apresentado um breve histórico abrangendo as primeiras cornetas e a evolução até modelos mais atuais. Por fim é feita uma descrição das principais aplicações das cornetas na atualidade, como ensaios de compatibilidade eletromagnética e *internet* via satélite.

2.2 – Tipos de corneta e seus usos

As antenas cornetas geralmente são caracterizadas por sua habilidade de efetuar a transição de um meio que suporta um pequeno número de modos de propagação, como um guia de onda, para outro que suporta um grande ou infinito número de modos de propagação, como o espaço livre [4]. A antena corneta é amplamente utilizada como elemento alimentador e receptor em radio astronomia, rastreamento via satélite e sistemas de comunicação em geral. Servem ainda como um padrão universal para calibração e medições de ganho de outras antenas. A grande gama de aplicações da antena corneta está relacionada com sua construção simples, fácil excitação, versatilidade, alto ganho e combinação de diversas características ideais que abrangem toda sua performance (ótima diretividade, larga banda de frequência, etc.).

Uma corneta eletromagnética pode possuir as mais diversas formas, quatro delas estão ilustradas na Figura 2.1 (a, b, c e d). O tipo e a direção, bem como a forma como a antena é excitada, pode ter um grande efeito com relação ao desempenho da antena como elemento irradiador. A escolha de um determinado tipo de antena dependerá da aplicação específica desejada.

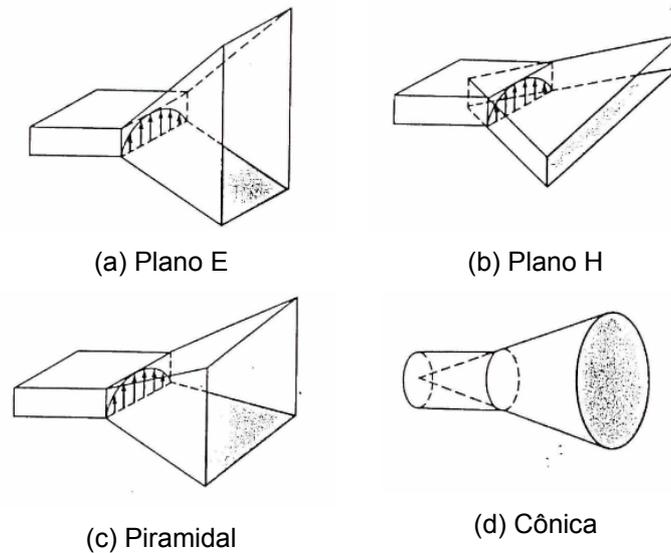


Figura 2.1 – Configurações típicas de antenas corneta (fonte: *Antenna theory: analysis and design, Third Edition* [4])

2.3 – Breve Histórico

A antena corneta é a mais simples e provavelmente a mais utilizada na faixa de microondas. Sua existência e primeiros usos datam de aproximadamente 1800, porém seu uso sistemático apenas se deu na década de 1930 com o advento das microondas e desenvolvimento dos guias de ondas. Desde então, diversos trabalhos foram realizados descrevendo seu mecanismo de radiação, características construtivas e aplicações. Grande parte desses documentos, publicados principalmente a partir de 1939, abrangem desde a teoria fundamental, princípios de operação até modelos matemáticos da corneta [5]-[7].

Desde sua descoberta e uso efetivo, as cornetas foram aplicadas as mais diversas áreas da ciência. Durante a Segunda Guerra Mundial foi amplamente utilizada como transmissora e receptora de sinais eletromagnéticos nas comunicações via radar [4].

Grandes cornetas foram construídas e utilizadas em pesquisas de astrofísica sendo que em 1965, ao utilizar uma corneta piramidal, os astrônomos Penzias e Wilson descobriram a radiação de fundo advinda do Big Bang. Posteriormente, em 1978, estes pesquisadores receberiam o prêmio Nobel por esse feito [8]-[9].

Diversas pesquisas também foram desenvolvidas com o objetivo de otimizar o desempenho da corneta por meio de modificações e melhoramentos em seus aspectos construtivos [6]. Estudos desse tipo permitiram a utilização das antenas

corneta em diversas outras aplicações na área de sistemas de telecomunicações, o que contribuiu para o grande desenvolvimento dessas áreas nas décadas de 1970 e 1980 [10]. As cornetas eletromagnéticas são ainda empregadas como padrão universal de calibração e medições de ganho de outras antenas [11].

2.4 – Principais aplicações na atualidade

Atualmente, as antenas cornetas estão sendo utilizadas em ensaios de CEM (Compatibilidade Eletromagnética). Neste sentido há um interesse por parte de diversos pesquisadores em desenvolver não apenas estudos com relação aos aspectos construtivos e melhoramentos possíveis de serem realizados nas antenas, mas também na caracterização dos campos irradiados por elas. Vários artigos vêm sendo publicados nessa área [2], [3], [12] e visam subsidiar e fornecer informações importantes para os ensaios de CEM.

As cornetas vêm sendo empregadas em aplicações de alta tecnologia na área de telecomunicações. Serviços como *internet* a rádio, *links* de microondas, *links* de alta velocidade para enlaces de curta distância e *internet* via satélite vêm empregando amplamente estas antenas em seus sistemas de comunicação, isoladamente ou como iluminador de uma antena parabólica. Pesquisas no sentido de otimizar o sistema antena parabólica e corneta (como iluminador), para obter ganhos mais elevados, vêm sendo desenvolvidas, principalmente para recepção dos sinais via satélite [13].

As antenas cornetas de banda larga também encontram aplicações nos sistemas de comunicação atuais. Anteriormente eram utilizadas em funções que exigiam uma faixa de frequência mais larga, como no caso da banda de canais de TV. Na atualidade, além destas aplicações, elas possuem aplicações de alta tecnologia, como *internet* de banda larga e *internet* sem fio (*wireless*) [13].

De forma geral, a presença dessas antenas em vários serviços considerados essenciais atualmente, como as citadas acima, entre outros, justifica o grande volume de pesquisas teóricas e experimentais empregados em seu desenvolvimento.

CAPÍTULO 3 - EQUAÇÕES DE CAMPO

3.1 – Introdução

O objetivo desse capítulo é estabelecer as equações de campo, irradiados por uma arbitrária, para região de campo distante. É apresentada, também, uma padronização dos termos e incógnitas que serão utilizados nos capítulos seguintes.

Alguns conceitos físicos como região de campo distante bem como a detalhada dedução das equações dos campos irradiados não são tratados aqui, uma vez que estão exaustivamente discutidos na literatura especializada [14].

3.2 – Equações de Maxwell

As equações de Maxwell, no domínio do tempo, na forma diferencial são [14]:

$$\nabla \times \vec{E}(r,t) = -\frac{\partial \vec{B}(r,t)}{\partial t} \quad (3.1)$$

$$\nabla \times \vec{H}(r,t) = \vec{J}(r,t) + \frac{\partial \vec{D}(r,t)}{\partial t} \quad (3.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D}(r,t) = \rho(r,t) \quad (3.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B}(r,t) = 0 \quad (3.4)$$

Onde:

$\vec{E}(r,t)$ é o vetor campo elétrico (V/m)

$\vec{H}(r,t)$ é o vetor campo magnético (A/m)

$\vec{D}(r,t)$ é o vetor densidade de fluxo elétrico (coulombs/m²)

$\vec{B}(r,t)$ é o vetor densidade de fluxo magnético (webers/m²)

$\vec{J}(r,t)$ é o vetor densidade de corrente elétrica (A/m²)

$\rho(r, t)$ é a densidade volumétrica de carga elétrica (coulombs/m³)

No domínio da frequência as equações de Maxwell tomam a seguinte forma[14]:

$$\nabla \times \vec{E}(r) = -j\omega \vec{B}(r) \quad (3.5)$$

$$\nabla \times \vec{H}(r) = \vec{J}(r) + j\omega \vec{D}(r) \quad (3.6)$$

$$\nabla \cdot \vec{D}(r) = \rho(r) \quad (3.7)$$

$$\nabla \cdot \vec{B}(r) = 0 \quad (3.8)$$

Neste trabalho, as antenas estarão trabalhando no espaço livre (vácuo), o que não deixa de ser uma excelente aproximação para a troposfera terrestre [4]. Neste caso, o meio (espaço livre) é linear, homogêneo, isotrópico e não dispersivo:

- Linear: as características do meio (σ, ε, μ) não dependem da intensidade do campo aplicado.
- Homogêneo: as características do meio (σ, ε, μ) não variam com a posição.
- Isotrópico: as características do meio (σ, ε, μ) não dependem da orientação (polarização) do campo.
- Não dispersivo: as características do meio (σ, ε, μ) não variam com a frequência.

Neste caso, as relações constitutivas do meio são:

$$\vec{D}(r, t) = \varepsilon \vec{E}(r, t) \quad (3.9)$$

$$\vec{B}(r, t) = \mu \vec{H}(r, t) \quad (3.10)$$

E as equações de Maxwell no domínio da frequência são reescritas como:

$$\nabla \times \vec{E}(r) = -j\omega \mu \vec{H}(r) \quad (3.11)$$

$$\nabla \times \vec{H}(r) = \vec{J}(r) + j\omega \varepsilon \vec{E}(r) \quad (3.12)$$

$$\nabla \cdot \vec{E}(r) = \frac{\rho(r)}{\varepsilon} \quad (3.13)$$

$$\nabla \cdot \vec{H}(r) = 0 \quad (3.14)$$

Onde ε e μ são a permissividade e a permeabilidade do meio, respectivamente. No espaço livre:

$$\varepsilon = 8,854 \times 10^{-12} \text{ (farads/m)}$$

$$\mu = 4\pi \times 10^{-7} \text{ (henries/m)}$$

Note que a velocidade de propagação da onda eletromagnética no espaço livre é igual a da luz:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

3.3 – Dualidade e carga magnética

Observando as equações de Maxwell, pode-se notar que as equações envolvendo \vec{H} são muito parecidas com as de \vec{E} . A única diferença está no fato de não existirem cargas e correntes magnéticas.

É comum no tratamento de problemas de antenas, a inclusão de cargas e correntes magnéticas equivalentes ainda que estas não existam fisicamente. Esse procedimento é de grande valia para solução de diversos problemas em eletromagnetismo e proporciona uma dualidade entre os campos elétrico e magnético [4], [14]. Com a inclusão de cargas e correntes magnéticas, as equações de Maxwell duais são escritas como:

$$\nabla \times \vec{E}(r) = -\vec{M}(r) - j\omega\mu\vec{H}(r) \quad (3.15)$$

$$\nabla \times \vec{H}(r) = \vec{J}(r) + j\omega\varepsilon\vec{E}(r) \quad (3.16)$$

$$\nabla \cdot \vec{E}(r) = \frac{\rho(r)}{\varepsilon} \quad (3.17)$$

$$\nabla \cdot \vec{H}(r) = \frac{\rho_m(r)}{\mu} \quad (3.18)$$

Onde:

$\vec{M}(r)$ é o vetor densidade de corrente magnética (V/m²)

$\rho_m(r)$ é a densidade de carga magnética (Webers/m³)

Todas as deduções realizadas ao longo deste trabalho serão feitas levando em conta as Equações de Maxwell duais.

3.4 – Vetores potenciais auxiliares

Na análise dos fenômenos de irradiação o procedimento usual é especificar as fontes e depois calcular os campos irradiados por elas. Nesse procedimento, é comum a introdução de funções auxiliares, conhecidas como potenciais vetores, que são de grande utilidade em diversas aplicações em eletromagnetismo. As funções mais comuns são o vetor potencial magnético \vec{A} e o vetor potencial elétrico \vec{F} [14]. Para facilitar, será adotado o índice “A” para os campos gerados por \vec{J} e o índice “F” para os campos gerados por \vec{M} .

Das equações de Maxwell, assumindo que a única fonte é \vec{J} , tem-se:

$$\nabla \cdot \vec{B}_A = \nabla \cdot (\mu \vec{H}_A) = 0 \quad (3.19)$$

Define-se então o vetor potencial magnético \vec{A} da seguinte forma:

$$\nabla \times \vec{A} = \vec{B}_A = \mu \vec{H}_A \quad (3.20)$$

De forma semelhante, assumindo que a única fonte é \vec{M} , tem-se:

$$\nabla \cdot \vec{D}_F = \nabla \cdot (\epsilon \vec{E}_F) = 0 \quad (3.21)$$

Define-se então o vetor potencial elétrico \vec{F} da seguinte forma:

$$-\nabla \times \vec{F} = \vec{D}_F = \varepsilon \vec{E}_F \quad (3.22)$$

Considerando as definições dos vetores potenciais nas equações (3.20) e (3.22) e as equações de Maxwell (3.15)-(3.18), pode-se mostrar que para uma distribuição superficial de corrente, os vetores \vec{A} e \vec{F} são dados por:

$$\vec{A}(x, y, z) = \frac{\mu}{4\pi} \iint_S \vec{J}_s(x', y', z') \frac{e^{-jkR}}{R} ds' \quad (3.23)$$

$$\vec{F}(x, y, z) = \frac{\varepsilon}{4\pi} \iint_S \vec{M}_s(x', y', z') \frac{e^{-jkR}}{R} ds' \quad (3.24)$$

onde $k = \omega\sqrt{\mu\varepsilon}$ é o número de onda.

3.5 – Radiação de campo de campo distante

Os campos eletromagnéticos de interesse no presente trabalho são aqueles situados na região de campo distante. Para computar os mesmos, depois de especificadas as fontes, deve-se resolver as equações de Maxwell com o auxílio dos vetores potenciais.

Os detalhes matemáticos de tal procedimento não serão tratados aqui, pois são amplamente divulgados na literatura [14]. Os campos elétrico e magnético irradiados (na região de campo distante) devido a uma fonte \vec{J} são dados por [4], [14]:

$$\left. \begin{array}{l} E_r \approx 0 \\ E_\theta \approx +j\omega A_\theta \\ E_\phi \approx -j\omega A_\phi \end{array} \right\} \rightarrow \vec{E}_A \approx -j\omega \vec{A} \quad (3.25)$$

$$\left. \begin{array}{l} H_r \approx 0 \\ H_\theta \approx +j \frac{\omega}{\eta} A_\phi = -\frac{E_\phi}{\eta} \\ H_\phi \approx -j \frac{\omega}{\eta} A_\theta = +\frac{E_\theta}{\eta} \end{array} \right\} \rightarrow \vec{H}_A \approx \frac{\hat{r}}{\eta} \times \vec{E}_A = -j \frac{\omega}{\eta} \hat{r} \times \vec{A} \quad (3.26)$$

De forma similar, os campos elétrico e magnético irradiados (na região de campo distante) devido a uma fonte \vec{M} são dados por [4], [14]:

$$\left. \begin{array}{l} H_r \approx 0 \\ H_\theta \approx -j\omega F_\theta \\ H_\phi \approx -j\omega F_\phi \end{array} \right\} \rightarrow \vec{H}_F \approx -j\omega \vec{F} \quad (3.27)$$

$$\left. \begin{array}{l} E_r \approx 0 \\ E_\theta \approx -j\omega\eta F_\phi = \eta H_\phi \\ E_\phi \approx +j\omega\eta F_\theta = -\eta H_\theta \end{array} \right\} \rightarrow \vec{E}_F \approx -\eta \hat{r} \times \vec{H}_F = j\omega\eta \hat{r} \times \vec{F} \quad (3.28)$$

nas equações acima $\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$ é a impedância intrínseca do meio.

Pelo princípio da superposição, os campos totais irradiados são dados por:
(3.25)

$$\vec{E} = \vec{E}_A + \vec{E}_F \quad (3.29)$$

$$\vec{H} = \vec{H}_A + \vec{H}_F \quad (3.30)$$

É importante destacar que os campos elétrico e magnético na região de campo distante são perpendiculares entre si e formam o modo de propagação TEM. Estas relações serão utilizadas no desenvolvimento de todas as equações para os campos irradiados pela antena investigada no presente trabalho.

3.6 – Campos irradiados por uma abertura

As equações (3.25)-(3.30) determinam os campos irradiados (na região de campo distante) no espaço livre devido às fontes \vec{J} e \vec{M} . Neste trabalho, é importante conhecer os campos irradiados por uma antena do tipo abertura, pois possuem aplicação direta no cálculo dos campos das antenas cornetas. Considerando a Figura 3.1, para observações na região de campo distante, R pode ser aproximado por [14]:

$$R \approx r - r' \cos \psi \quad (\text{para variações de fase}) \quad (3.31)$$

$$R \approx r \quad (\text{para variações de amplitude}) \quad (3.32)$$

onde ψ é o ângulo entre os vetores \vec{r} e \vec{r}' , como mostrado na Figura 3.1. As coordenadas $(x', y', z', \text{ou } r', \theta', \phi')$ indicam o espaço ocupado pelas fontes \vec{J} e \vec{M} . As coordenadas $(x, y, z, \text{ou } r, \theta, \phi)$ representam o ponto de observação.

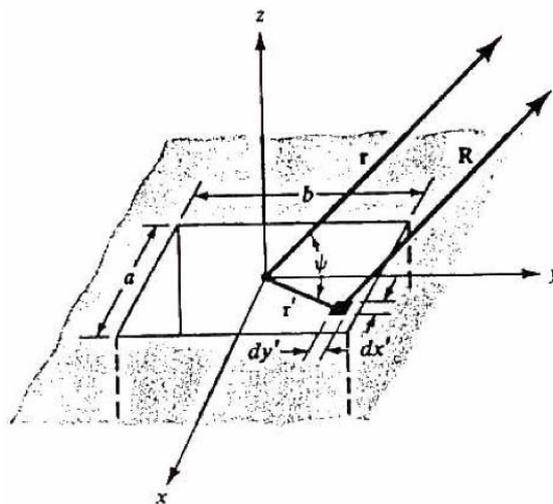


Figura 3.1 – Abertura e sistema de coordenadas (fonte: *Antenna theory: analysis and design, Third Edition* [4])

Utilizando as relações (3.31) e (3.32), as equações (3.23) e (3.24) podem ser reescritas da seguinte forma:

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \iint_S \vec{J}_s \frac{e^{-jkR}}{R} ds' \approx \frac{\mu e^{-jkR}}{4\pi r} \vec{N} \quad (3.33)$$

$$\vec{N} = \iint_S \vec{J}_s e^{+jkr' \cos \psi} ds' \quad (3.34)$$

$$\vec{F} = \frac{\epsilon}{4\pi} \iint_S \vec{M}_s \frac{e^{-jkR}}{R} ds' \simeq \frac{\epsilon e^{-jkr}}{4\pi r} \vec{L} \quad (3.35)$$

$$\vec{L} = \iint_S \vec{M}_s e^{jkr' \cos \psi} ds' \quad (3.36)$$

Combinando as relações acima com as equações (3.25)-(3.30), os campos elétrico e magnético totais irradiados podem ser escritos da seguinte forma:

$$E_r \simeq 0 \quad (3.37)$$

$$E_\theta \simeq -\frac{jke^{-jkr}}{4\pi r} (L_\phi + \eta N_\theta) \quad (3.38)$$

$$E_\phi \simeq +\frac{jke^{-jkr}}{4\pi r} (L_\theta - \eta N_\phi) \quad (3.39)$$

$$H_r \simeq 0 \quad (3.40)$$

$$H_\theta \simeq +\frac{jke^{-jkr}}{4\pi r} \left(N_\theta - \frac{L_\theta}{\eta} \right) \quad (3.41)$$

$$H_\phi \simeq -\frac{jke^{-jkr}}{4\pi r} \left(N_\phi + \frac{L_\phi}{\eta} \right) \quad (3.42)$$

Onde os termos N_θ , N_ϕ , L_θ e L_ϕ obtidos a partir de (3.34) e (3.36), são:

$$\vec{N} = \iint_S \vec{J}_s e^{-jkr' \cos \psi} ds' = \iint_S (J_x \hat{x} + J_y \hat{y} + J_z \hat{z}) e^{-jkr' \cos \psi} ds' \quad (3.43)$$

$$\vec{L} = \iint_S \vec{M}_s e^{jkr' \cos \psi} ds' = \iint_S (M_x \hat{x} + M_y \hat{y} + M_z \hat{z}) e^{jkr' \cos \psi} ds' \quad (3.44)$$

Fazendo uma transformação para coordenadas esféricas, (3.43) e (3.44) podem ser escritas em termos das componentes θ e ϕ da seguinte forma:

$$N_\theta = \iint_S (J_x \cos \theta \cos \phi + J_y \cos \theta \sin \phi - J_z \sin \theta) e^{+jkr' \cos \psi} ds' \quad (3.45)$$

$$N_\phi = \iint_S (-J_x \sin \phi + J_y \cos \phi) e^{+jkr' \cos \psi} ds' \quad (3.46)$$

$$L_{\theta} = \iint_S (M_x \cos \theta \cos \phi + M_y \cos \theta \sin \phi - M_z \sin \theta) e^{+jkr' \cos \psi} ds' \quad (3.47)$$

$$L_{\phi} = \iint_S (-M_x \sin \phi + M_y \cos \phi) e^{+jkr' \cos \psi} ds' \quad (3.48)$$

onde, para o sistema de coordenadas da Figura 3.1

$$\begin{aligned} r' \cos \psi &= r' \cdot \hat{r} = (x' \cdot \hat{x} + y' \cdot \hat{y}) \cdot (\sin \theta \cos \phi \cdot \hat{x} + \sin \theta \sin \phi \cdot \hat{y} + \cos \theta \cdot \hat{z}) \\ &= x' \sin \theta \cos \phi + y' \sin \theta \sin \phi \end{aligned} \quad (3.49)$$

$$ds' = dx' dy' \quad (3.50)$$

Assim, para abertura ilustrada na Figura 3.1, conhecidas as distribuições superficiais de corrente \vec{J}_s e \vec{M}_s calcula-se as integrais dadas por (3.45)-(3.48) e obtêm-se os campos por meio de (3.37)-(3.42).

CAPÍTULO 4 - MODELO FÍSICO E MATEMÁTICO DE UMA ANTENA CORNETA PIRAMIDAL

4.1 – Introdução

O objetivo deste capítulo é estabelecer um modelo físico e matemático para uma antena corneta piramidal. Com base na teoria eletromagnética apresentada no Capítulo 3, as equações de campo da antena corneta piramidal são deduzidas e implementadas em um algoritmo computacionalmente utilizando o ambiente MATLAB® 7.0. A partir do algoritmo desenvolvido são realizadas diversas simulações para investigação dos campos irradiados e análise do comportamento físico da corneta. Alguns aspectos construtivos e de ordem prática também são explorados.

4.2 – Princípio da equivalência

Seja um volume V (meio 1) limitado por uma superfície S , conforme ilustrado na Figura 4.1a. O meio que envolve o volume V é o meio 2. Os meios são assumidos homogêneos, lineares e isotrópicos.

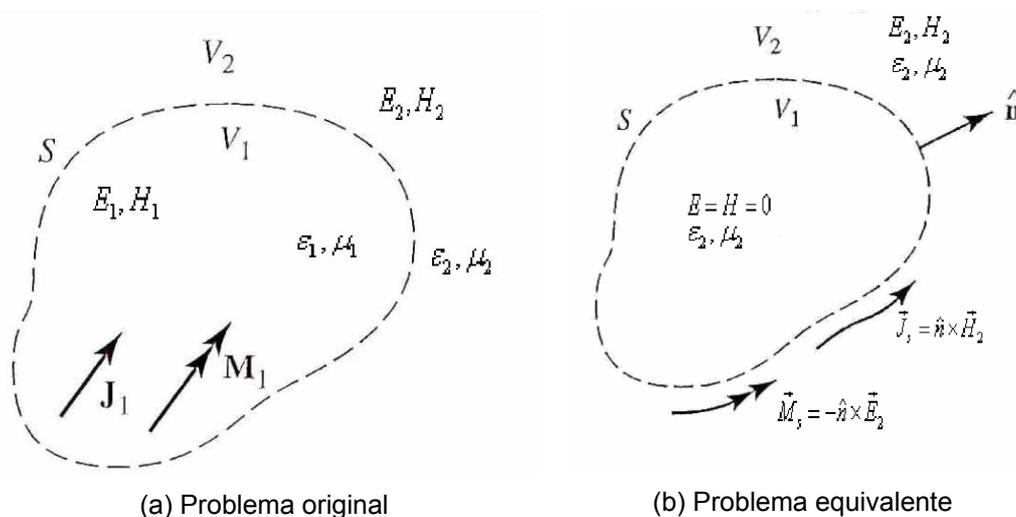


Figura 4.1 – Problema original e equivalente (fonte: adaptado de *Antenna theory: analysis and design, Third Edition* [4])

Se os campos tangenciais sobre S forem conhecidos, pode-se obter um problema equivalente, conforme mostrado na Figura 4.1b, onde \vec{E}_2 e \vec{H}_2 são os mesmos do problema original [4]. A prova da equivalência pode ser entendida da seguinte maneira: nos dois problemas o meio 2 é o mesmo (mesma equação de onda). As soluções de \vec{E}_2 e \vec{H}_2 serão as mesmas se as condições de contorno forem as mesmas, o que é obtido através das correntes equivalentes dadas por:

$$\vec{J}_s = \hat{n} \times \vec{H} \quad (4.1)$$

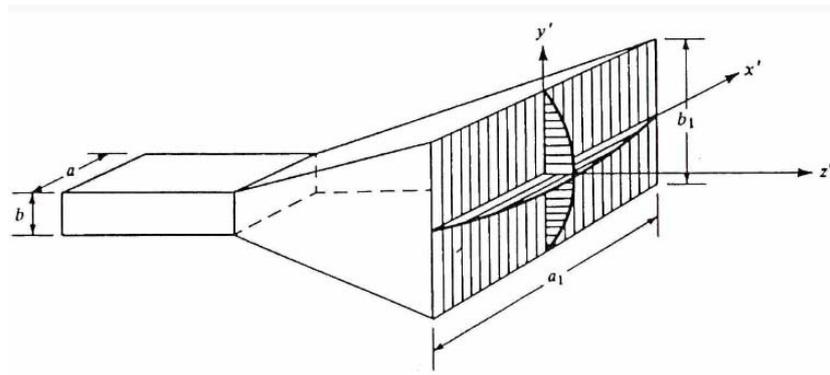
$$\vec{M}_s = -\hat{n} \times \vec{E} \quad (4.2)$$

A vantagem do problema equivalente é que, neste caso, todo o espaço tem parâmetros ε_2 e μ_2 e as equações estabelecidas no Capítulo 3 para cálculo dos campos distantes, que são válidas apenas para o espaço livre, podem ser utilizadas [4]. Em diversos problemas do eletromagnetismo é mais fácil formar um problema equivalente que fornece a mesma solução dentro da região de interesse. Este é o caso, por exemplo, das antenas de abertura.

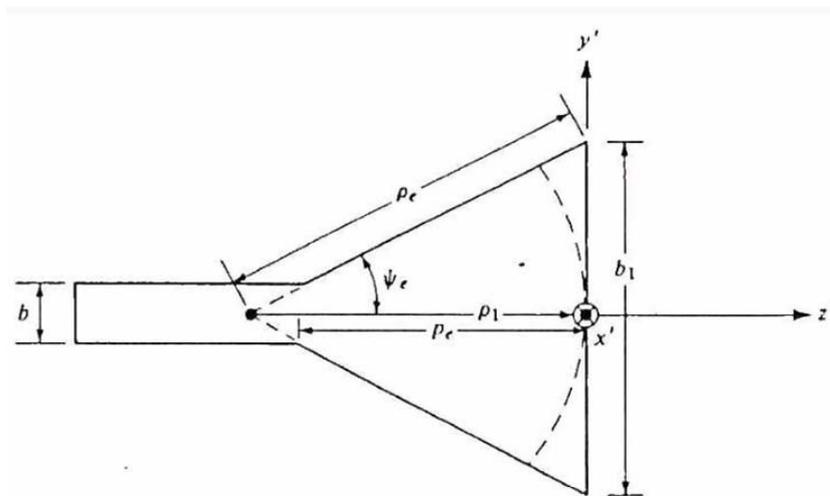
4.3 – Corneta piramidal

A Figura 4.2a ilustra uma antena corneta piramidal. As Figuras 4.2b e 4.2c ilustram as vistas do plano-E e do plano-H, respectivamente. O plano-E ($\phi = \frac{\pi}{2}$) é assim definido porque o campo \vec{E} na abertura é paralelo a este plano. O plano-H ($\phi = 0$), de forma semelhante, é assim definido porque o campo \vec{H} na abertura é paralelo a este plano. Observe que a antena corneta piramidal tem a abertura expandida em ambos os planos. Uma antena corneta que tem a abertura expandida apenas no plano H é chamada de corneta em setor no plano H. Analogamente, uma antena corneta que tem a abertura expandida apenas no plano E é chamada de corneta em setor no plano E.

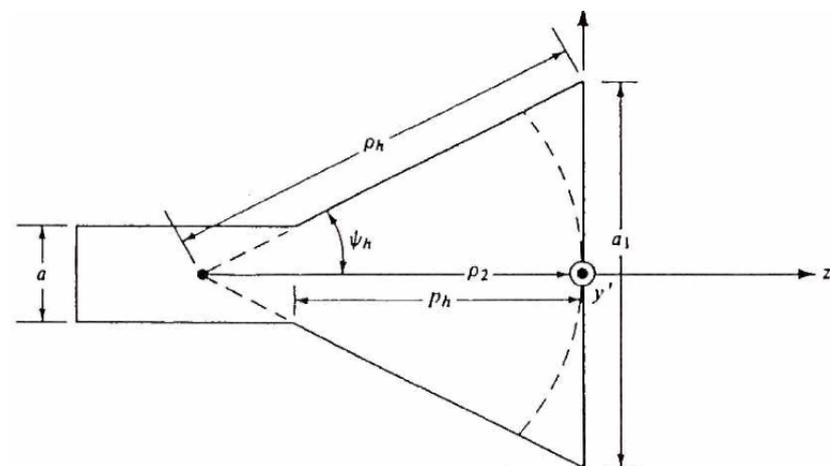
A corneta pode ser tratada como uma antena de abertura. Para determinação dos campos irradiados pela antena, o princípio da equivalência será utilizado.



(a) Corneta piramidal



(b) Vista do plano-E



(c) Vista do plano-H

Figura 4.2 – Corneta piramidal e sistemas de coordenadas (fonte: *Antenna theory: analysis and design, Third Edition* [4])

4.3.1 – Problema equivalente

Para desenvolver um problema equivalente exato, os campos elétrico e magnético tangentes a uma superfície fechada S devem ser conhecidos. A superfície escolhida é um plano que se estende de $-\infty$ a $+\infty$ no plano xy que coincide com a abertura da corneta, conforme ilustra a Figura 4.3. Sobre toda a superfície tem-se a formação das correntes J_s e M_s para obtenção do problema equivalente. A dificuldade encontrada neste problema é que ambas as correntes não são exatamente zero fora da abertura e suas expressões não são conhecidas nessa região. Neste problema será adotada a aproximação de que os campos elétrico e magnético na abertura são nulos (ou seja, J_s e M_s também são iguais a zero, de acordo com (4.1) e (4.2)). Pode ser mostrado, por meio de comparações entre medições e dados da literatura especializada, que esta aproximação fornece bons resultados [4].

Os campos na abertura podem ser calculados tratando a antena corneta como um guia de onda radial [4]. Os campos dentro da corneta podem ser expressos em termos de funções de onda cilíndricas TE e TM, que incluem as funções de Hankel. Este método permite o cálculo dos campos não apenas na abertura, mas também dentro da corneta. O processo de cálculo é trabalhoso e não será incluído aqui; no entanto pode ser encontrado na referência [14].

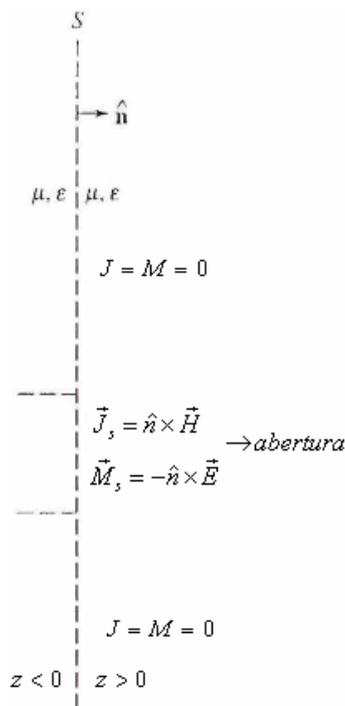


Figura 4.3 – Problema equivalente

Pode-se mostrar que se (1) a antena é iluminada pelo modo fundamental TE_{10} de um guia de onda e (2) o comprimento da antena é maior que as dimensões da abertura, os campos elétrico e magnético tangentes à abertura são dados por [4], [20]:

$$\left. \begin{aligned} E'_y(x', y') &= E_0 \cos\left(\frac{\pi}{a_1} x'\right) e^{-j[k(x'^2/\rho_2 + y'^2/\rho_1)/2]} & -a/2 \leq x' \leq +a/2 \\ H'_x(x', y') &= -\frac{E_0}{\eta} \cos\left(\frac{\pi}{a_1} x'\right) e^{-j[k(x'^2/\rho_2 + y'^2/\rho_1)/2]} & -b/2 \leq y' \leq +b/2 \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

com base nesses campos, as correntes elétrica e magnética equivalentes podem ser obtidas por meio das condições de contorno (4.1) e (4.2):

$$\left. \begin{aligned} J'_y(x', y') &= -\frac{E_0}{\eta} \cos\left(\frac{\pi}{a_1} x'\right) e^{-j[k(x'^2/\rho_2 + y'^2/\rho_1)/2]} & -a/2 \leq x' \leq +a/2 \\ M'_x(x', y') &= E_0 \cos\left(\frac{\pi}{a_1} x'\right) e^{-j[k(x'^2/\rho_2 + y'^2/\rho_1)/2]} & -b/2 \leq y' \leq +b/2 \end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$

Obtidas as correntes superficiais equivalentes, tem-se um problema análogo ao da Seção 3.5 e as equações (3.37)-(3.42) podem ser utilizadas para o cálculo dos campos irradiados. Antes, porém, de iniciar esse cálculo, duas observações importantes merecem ser feitas.

1. Na construção de um problema equivalente, se os campos e correntes forem exatos, isto é, as soluções das Equações de Maxwell, então o problema equivalente tem a mesma solução do problema original. Em situações práticas, entretanto, em que a antena está imersa no espaço livre (que é o caso investigado), assume-se que os campos no plano da abertura são desprezíveis (nulos) fora de uma determinada região (abertura). Porém, isto não é exatamente verdade porque efeitos de difração na borda da abertura, os campos provenientes diretamente do alimentador, etc., farão com que os campos sejam não nulos (embora, geralmente, muito pequenos) fora da área da abertura. Neste trabalho esta aproximação (campos nulos fora da área da abertura) será adotada. Medições e outros dados disponíveis na literatura mostram que essa consideração produz bons resultados [4]. Note que se a corneta estivesse montada em um plano

condutor elétrico perfeito (uma antena montada na carcaça metálica de uma nave, por exemplo), um problema equivalente exato poderia ser criado.

2. Note que os campos na abertura possuem uma variação senoidal de amplitude na direção x' e uma variação quadrática de fase tanto na direção x' como na direção y' . Esta variação quadrática de fase está relacionada com a geometria da antena, sendo que os diferentes caminhos percorridos até a abertura pelas ondas eletromagnéticas propiciam uma diferença de fase que varia com o quadrado da distância [4].
3. No interior da abertura, cada modo (TE_{m0}) se propaga livremente desde que as dimensões da antena sejam superiores a um valor mínimo associado a cada modo específico de propagação. Para dedução das densidades de corrente adotou-se apenas o modo TE_{10} , visto que as antenas cornetas comerciais existentes geralmente possuem dimensões que são suficientes para suportarem apenas o modo $m = 1$, porém não suficientes para modos superiores [20]. Em altas frequências, no entanto, com a diminuição do comprimento de onda [3], modos superiores de propagação são detectados na abertura. Esse fato será tratado em mais detalhes adiante.

4.3.2 – Campos irradiados

De posse das correntes equivalentes, os campos serão calculados seguindo o procedimento estabelecido na Seção 3.5 do Capítulo 3.

Da equação (3.45) tem-se:

$$N_{\theta} = \int_{-\frac{a_1}{2}}^{+\frac{a_1}{2}} \int_{-\frac{b_1}{2}}^{+\frac{b_1}{2}} -\frac{E_0}{\eta} \cos\left(\frac{\pi}{a_1} x'\right) e^{-j\left[k\left(x'^2/\rho_2 + y'^2/\rho_1\right)/2\right]} \cdot e^{+jkr'\cos\psi} \cdot \cos\theta \sin\phi \cdot dy' dx' \quad (4.5)$$

Dividindo em duas integrais e considerando a relação (3.49), têm-se:

$$N_{\theta} = -\frac{E_0}{\eta} \cos\theta \sin\phi I_1 I_2 \quad (4.6)$$

$$I_1 = \int_{-\frac{a_1}{2}}^{+\frac{a_1}{2}} \cos\left(\frac{\pi}{a_1} x'\right) e^{-jk\left(\frac{x'^2}{2\rho_2} - x' \sin\theta \cos\phi\right)} dx' \quad (4.7)$$

$$I_2 = \int_{-\frac{b_1}{2}}^{+\frac{b_1}{2}} e^{-jk\left(\frac{y'^2}{2\rho_1} - y' \sin\theta \sin\phi\right)} dy' \quad (4.8)$$

Iniciando pela integral mais simples, I_2 pode ser reescrita, completando o quadrado, como:

$$I_2 = \int_{-\frac{b_1}{2}}^{+\frac{b_1}{2}} e^{-j\left(\frac{k y'^2}{2\rho_1} - k_y y'\right)} dy' \quad (4.9)$$

$$I_2 = e^{j\left(\frac{k_y^2 \rho_1}{2k}\right) + \frac{b_1}{2}} \int_{-\frac{b_1}{2}}^{+\frac{b_1}{2}} e^{-j\frac{(k_y' - k_y \rho_1)^2}{2k\rho_1}} dy' \quad (4.10)$$

onde

$$k_y = k \sin\theta \sin\phi \quad (4.11)$$

Fazendo uma mudança de variável, tem-se:

$$\begin{aligned} \sqrt{\frac{\pi}{2}} t &= \sqrt{\frac{1}{2k\rho_1}} (k_y' - k_y \rho_1) \\ t &= \sqrt{\frac{1}{\pi k\rho_1}} (k_y' - k_y \rho_1) \\ dt &= \sqrt{\frac{k}{\pi\rho_1}} dy' \end{aligned} \quad (4.12)$$

Assim, (4.10) rediz para:

$$I_2 = \sqrt{\frac{\pi\rho_1}{k}} e^{j\left(\frac{k_y^2 \rho_1}{2k}\right) + \frac{b_1}{2}} \int_{t_1}^{t_2} e^{-j\frac{\pi}{2} t^2} dt$$

$$I_2 = \sqrt{\frac{\pi\rho_1}{k}} e^{j\left(\frac{k_y^2\rho_1}{2k}\right)} \int_{t_1}^{t_2} \left[\cos\left(\frac{\pi}{2}t^2\right) - j \sin\left(\frac{\pi}{2}t^2\right) \right] dt \quad (4.13)$$

A equação (4.13) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$I_2 = \sqrt{\frac{\pi\rho_1}{k}} e^{j\left(\frac{k_y^2\rho_1}{2k}\right)} \left\{ \left[C(t_2) - C(t_1) - j[S(t_2) - S(t_1)] \right] \right\} \quad (4.14)$$

onde

$$t_1 = \sqrt{\frac{1}{\pi k \rho_1}} \left(-\frac{kb_1}{2} - k_y \rho_1 \right) \quad (4.15)$$

$$t_2 = \sqrt{\frac{1}{\pi k \rho_1}} \left(\frac{kb_1}{2} - k_y \rho_1 \right) \quad (4.16)$$

$$C(x) = \int_0^x \cos\left(\frac{\pi}{2}t^2\right) dt \quad (4.17)$$

$$S(x) = \int_0^x \sin\left(\frac{\pi}{2}t^2\right) dt \quad (4.18)$$

$C(x)$ e $S(x)$ são conhecidas como integrais cosseno e seno de Fresnel [16]. As integrais de Fresnel não possuem solução analítica e exigem métodos computacionais especiais para sua solução [15]. Tabelas das integrais (4.17) e (4.18) para uma faixa de valores de 'x' podem ser encontradas na referência [16].

Para solução de I_1 pode-se reescrever $\cos\left(\frac{\pi}{a_1}x'\right)$ da seguinte forma

$$\cos\left(\frac{\pi}{a_1}x'\right) = \frac{e^{\frac{j\pi}{a_1}x'} + e^{-\frac{j\pi}{a_1}x'}}{2} \quad (4.19)$$

Substituindo (4.19) em (4.7), tem-se:

$$I_1 = \int_{-\frac{a_1}{2}}^{+\frac{a_1}{2}} \frac{e^{j\frac{\pi}{a_1}x'} + e^{-j\frac{\pi}{a_1}x'}}{2} \cdot e^{-jk\left(\frac{x'^2}{2\rho_2} - x'\sin\theta\cos\phi\right)} dx' \quad (4.20)$$

Dividindo (4.20) em duas integrais, tem-se:

$$I_1 = I_1' + I_1''$$

$$I_1' = \frac{1}{2} \int_{-\frac{a_1}{2}}^{+\frac{a_1}{2}} e^{-j\left[\frac{kx'^2}{2\rho_2} - \left(k\sin\theta\cos\phi + \frac{\pi}{a_1}\right)x'\right]} dx' \quad (4.21)$$

$$I_1'' = \frac{1}{2} \int_{-\frac{a_1}{2}}^{+\frac{a_1}{2}} e^{-j\left[\frac{kx'^2}{2\rho_2} - \left(k\sin\theta\cos\phi - \frac{\pi}{a_1}\right)x'\right]} dx' \quad (4.22)$$

Fazendo

$$k_x' = k\sin\theta\cos\phi + \frac{\pi}{a_1} \quad (4.23)$$

$$k_x'' = k\sin\theta\cos\phi - \frac{\pi}{a_1} \quad (4.24)$$

as integrais (4.21) e (4.22) podem ser reescritas da seguinte forma:

$$I_1' = \frac{1}{2} \int_{-\frac{a_1}{2}}^{+\frac{a_1}{2}} e^{-j\left[\frac{kx'^2}{2\rho_2} - k_x'x'\right]} dx' \quad (4.25)$$

$$I_1'' = \frac{1}{2} \int_{-\frac{a_1}{2}}^{+\frac{a_1}{2}} e^{-j\left[\frac{kx'^2}{2\rho_2} - k_x''x'\right]} dx' \quad (4.26)$$

As integrais (4.25) e (4.26) são idênticas à (4.9) (a menos da constante $\frac{1}{2}$) e podem

ser solucionadas seguindo o mesmo procedimento. Os resultados obtidos são:

$$I_1 = I_1' + I_1''$$

$$I_1 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi \rho_2}{k}} \left(e^{j \left(\frac{k'_x \rho_2}{2k} \right)} \left\{ [C(t'_2) - C(t'_1)] - j[S(t'_2) - S(t'_1)] \right\} \right. \\ \left. + e^{j \left(\frac{k''_x \rho_2}{2k} \right)} \left\{ [C(t''_2) - C(t''_1)] - j[S(t''_2) - S(t''_1)] \right\} \right) \quad (4.27)$$

onde

$$t'_1 = \sqrt{\frac{1}{\pi k \rho_2}} \left(-\frac{ka_1}{2} - k'_x \rho_2 \right) \quad (4.28)$$

$$t'_2 = \sqrt{\frac{1}{\pi k \rho_2}} \left(+\frac{ka_1}{2} - k'_x \rho_2 \right) \quad (4.29)$$

$$t''_1 = \sqrt{\frac{1}{\pi k \rho_2}} \left(-\frac{ka_1}{2} - k''_x \rho_2 \right) \quad (4.30)$$

$$t''_2 = \sqrt{\frac{1}{\pi k \rho_2}} \left(+\frac{ka_1}{2} - k''_x \rho_2 \right) \quad (4.31)$$

$C(x)$ e $S(x)$ são as integrais de Fresnel dadas por (4.17) e (4.18).

As integrais N_ϕ , L_θ e L_ϕ , dadas por (3.45)-(3.48), podem ser avaliadas de forma similar. O resultado final das integrais:

$$N_\theta = -\frac{E_0}{\eta} \cos \theta \sin \phi I_1 I_2 \quad (4.32)$$

$$N_\phi = -\frac{E_0}{\eta} \cos \phi I_1 I_2 \quad (4.33)$$

$$L_\theta = E_0 \cos \theta \cos \phi I_1 I_2 \quad (4.34)$$

$$L_\phi = -E_0 \sin \phi I_1 I_2 \quad (4.35)$$

onde I_1 e I_2 são dados por (4.27) e (4.14), respectivamente.

Combinando (4.32)-(4.35) com as equações de campo dadas por (3.37)-(3.42), as componentes de campo distante do campo elétrico reduzem-se a

$$E_r = 0 \quad (4.36)$$

$$\begin{aligned} E_\theta &= -j \frac{ke^{jkr}}{4\pi r} [L_\theta + \eta N_\theta] \\ &= j \frac{kE_0 e^{-jkr}}{4\pi r} [\sin \phi (1 + \cos \theta) I_1 I_2] \end{aligned} \quad (4.37)$$

$$\begin{aligned} E_\phi &= +j \frac{ke^{jkr}}{4\pi r} [L_\phi + \eta N_\phi] \\ &= j \frac{kE_0 e^{-jkr}}{4\pi r} [\cos \phi (\cos \theta + 1) I_1 I_2] \end{aligned} \quad (4.38)$$

As soluções gerais para os campos irradiados pela corneta dados por (4.36)-(4.38) são essencialmente equivalentes às deduzidos por Barrow e Chu [17] utilizando as funções de Hankel.

Nos planos E e H, as equações (4.36)-(4.38) reduzem-se a

$$\text{Plano E } (\phi = \frac{\pi}{2})$$

$$E_r = E_\phi = 0 \quad (4.39)$$

$$E_\theta = j \frac{kE_0 e^{-jkr}}{4\pi r} [(1 + \cos \theta) I_1 I_2] \quad (4.40)$$

$$\text{Plano H } (\phi = 0)$$

$$E_r = E_\theta = 0 \quad (4.41)$$

$$E_\phi = j \frac{kE_0 e^{-jkr}}{4\pi r} [(\cos \theta + 1) I_1 I_2] \quad (4.42)$$

Neste ponto, os seguintes comentários são oportunos:

1. Desprezando os efeitos de borda, o diagrama de radiação de uma corneta piramidal pode ser determinado se as dimensões da abertura e a distribuição de campo na abertura forem conhecidas por meio de (4.36)-(4.38).
2. Analisando as equações (4.39) e (4.40), a menos de um fator de normalização, os campos da antena corneta piramidal no plano E ($\phi = \frac{\pi}{2}$) são idênticos aos campos para uma antena corneta em setor

no plano E [4]. De forma similar, os campos para uma antena corneta piramidal no plano H ($\phi = 0$) são idênticos aos campos para uma antena em setor no plano H [4]. Dessa forma, um processo usual ao analisar uma antena corneta piramidal é combinar os resultados obtidos para uma antena corneta em setor E e uma antena corneta em setor H. Essa consideração é importante e será utilizada em algumas análises a serem realizadas na próxima seção.

4.4 – Análises físicas

Uma vez deduzidas as equações para cálculo do campo da antena corneta piramidal, estas equações foram implementadas em um algoritmo utilizando o ambiente MATLAB® 7.0. As integrais de Fresnel foram avaliadas numericamente utilizando rotinas computacionais confiáveis, semelhantes às empregadas no software *Mathematica* [15]. Utilizando o algoritmo foram realizadas algumas análises do comportamento eletromagnético da antena corneta. Sabe-se que para uma dada abertura a diretividade é máxima para uma distribuição uniforme de campo na abertura [21]. Variações no módulo ou na fase do campo através da abertura diminuem a diretividade. Para obter uma distribuição na abertura tão uniforme quanto possível, é necessária uma corneta muito longa com um ângulo de abertura pequeno. Entretanto, do ponto de vista de conveniência prática, a corneta deveria ser tão pequena quanto possível. Assim nesta seção são realizadas análises de sensibilidade investigando o comportamento dos diagramas de radiação para variações do ângulo de abertura e do comprimento da antena. Análises similares são feitas para verificar os efeitos das variações de fase na abertura e as principais diferenças entre os diagramas obtidos nos planos E e H. Por fim é feita uma análise do comportamento dos diagramas de radiação ao longo de uma faixa de frequência.

4.4.1 – Análises físicas - Plano H

O diagrama de radiação do campo normalizado (em dB) no plano H para uma corneta piramidal é ilustrado na Figura 4.4. As dimensões da antena estão indicadas e seguem a nomenclatura ilustrada na Figura 4.2 (a, b e c) Pela figura pode-se observar que o diagrama da antena corneta no plano H é praticamente livre de lobos laterais.

Esse resultado era esperado, já que para esse plano tem-se uma distribuição de campo sobre a dimensão x que diminui gradualmente a zero na borda da abertura, conforme as equações (4.3). Esse resultado será retomado na sub-seção 4.4.2 onde é realizada uma comparação com o diagrama obtido para o plano E.

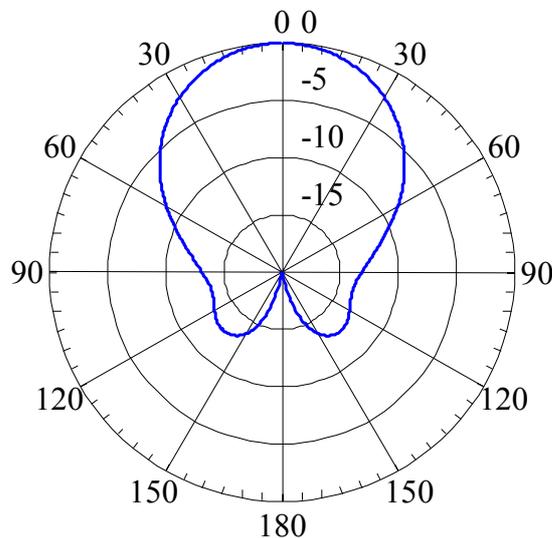


Figura 4.4 – Diagrama de campo - Plano H
($f = 2\text{GHz}$, $\rho_1 = \rho_2 = 100\text{cm}$, $a_1 = 60\text{cm}$, $b_1 = 50\text{cm}$)

A Figura 4.4 ilustra o diagrama de radiação do campo para uma antena corneta piramidal típica. É de interesse, principalmente prático, a análise do comportamento desse diagrama quando são alterados alguns parâmetros como, por exemplo, as dimensões da antena e ângulo de abertura. As Figuras 4.5 e 4.6 ilustram os diagramas de radiação obtidos nas análises para diferentes valores desses parâmetros.

O efeito da variação do comprimento da corneta na largura do feixe do diagrama de radiação é ilustrado na Figura 4.5, para um ângulo de abertura constante igual a $2\psi_h = 20^\circ$. Pode-se observar que, para um aumento do comprimento da corneta há uma redução da largura do feixe até um determinado ponto, a partir do qual o diagrama praticamente não sofre mais modificações com o aumento do comprimento da corneta.

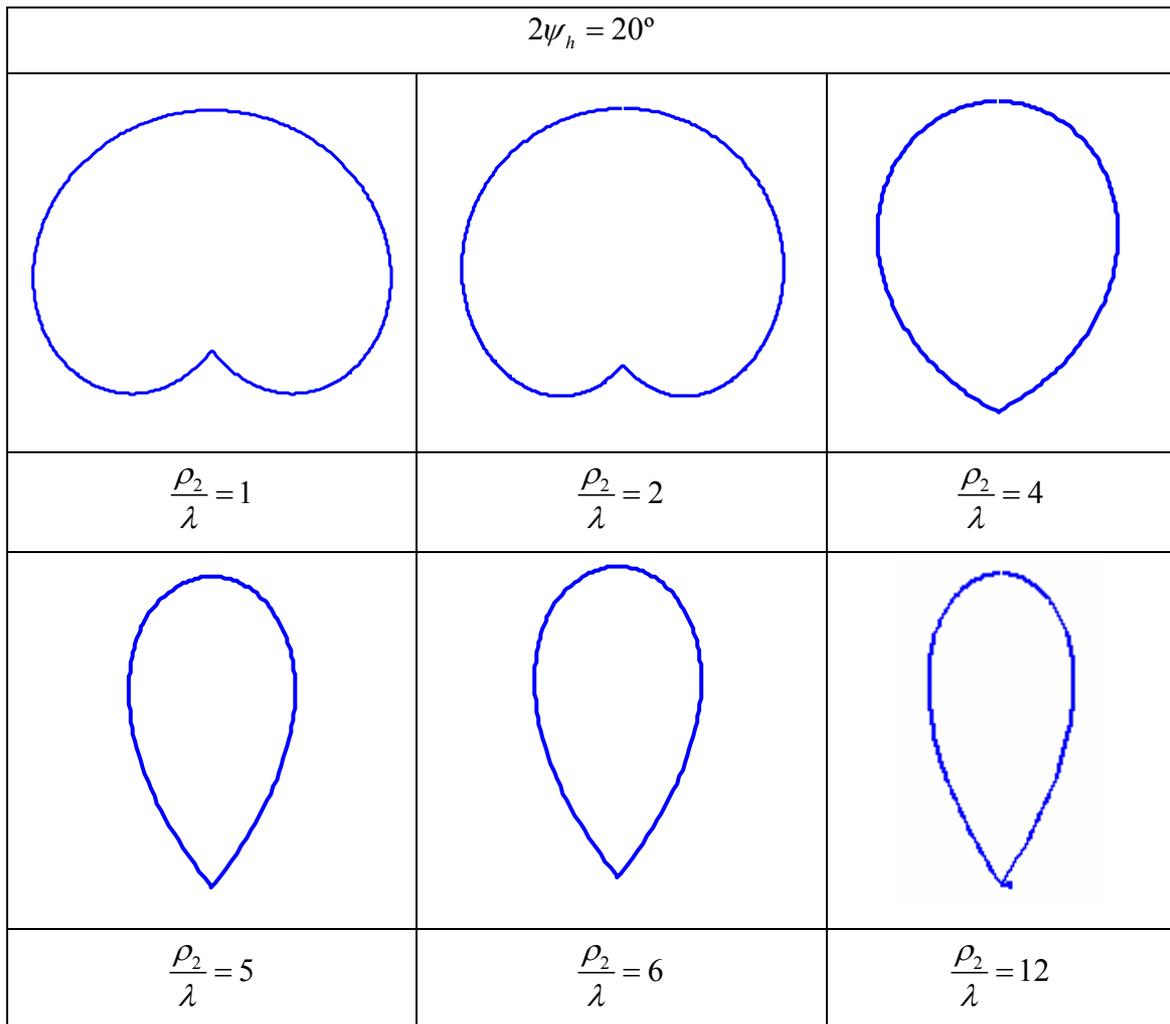


Figura 4.5 – Diagramas de radiação típicos da corneta no plano H para ângulo de abertura $2\psi_h = 20^\circ$ fixo e comprimento da corneta variável

O efeito da variação do ângulo de abertura para um comprimento da corneta constante, no caso $\frac{\rho_2}{\lambda} = 4$, é ilustrado na Figura 4.6. Pode-se observar que à medida que ψ_h cresce, a largura do feixe diminui e depois aumenta novamente. Assim, para um determinado comprimento da corneta, tem-se um ângulo de abertura ótimo no qual a largura do feixe é mínima. A razão para esse tipo de comportamento pode ser entendida considerando o comportamento da distribuição de campo na abertura da corneta. Normalmente se espera que quanto menor seja o ângulo de abertura, mais aberto será o feixe. Entretanto, o comportamento para ângulos de abertura mais elevados é diferente devido ao fato de que a fase não é constante ao longo da abertura, possuindo uma dependência quadrática conforme já discutido anteriormente.

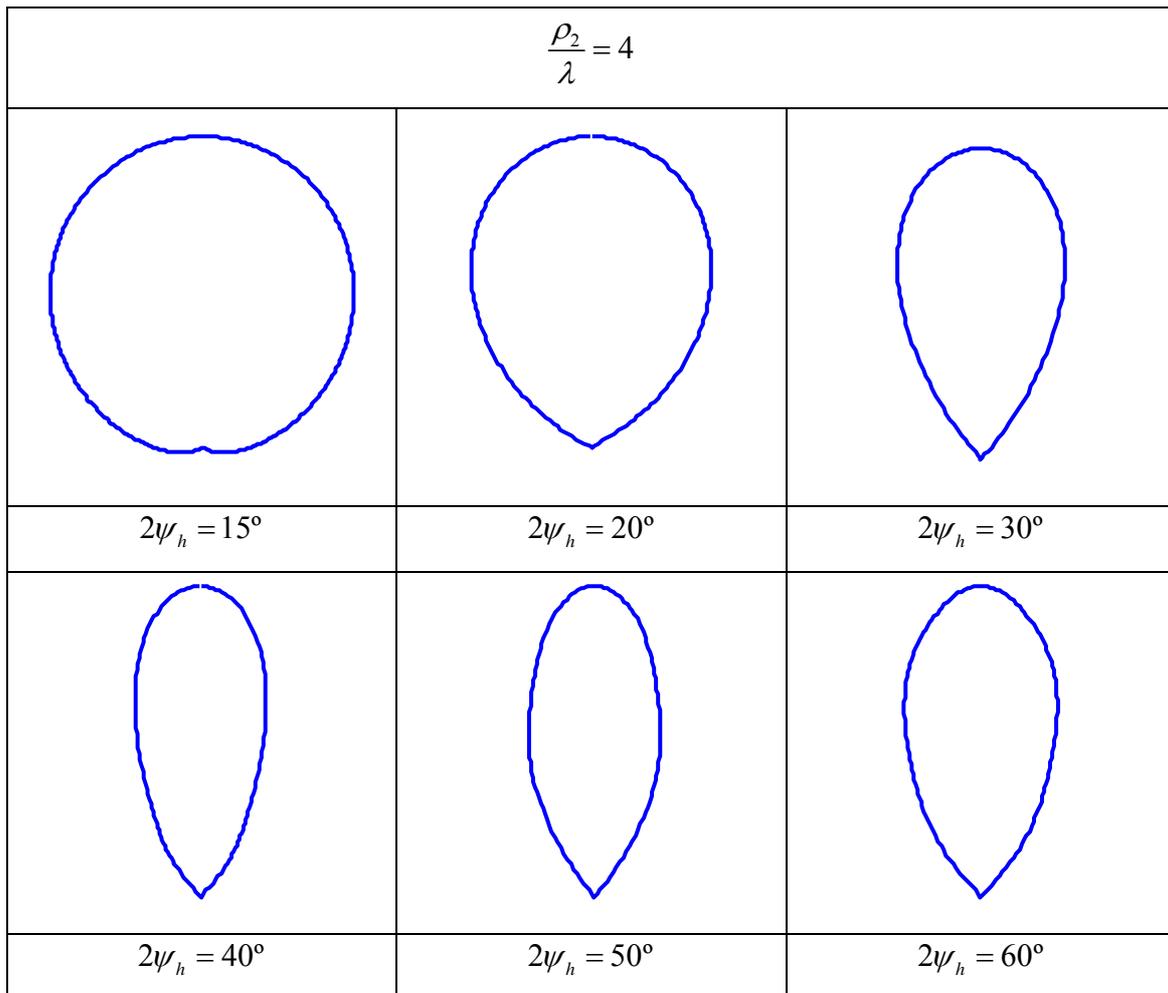


Figura 4.6 – Diagramas de radiação típicos da corneta no plano H para comprimento da

corneta constante $\frac{\rho_2}{\lambda} = 4$ e ângulo de abertura $2\psi_h$ variável

Para pequenos ângulos de abertura, a diferença de fase entre um ponto da frente de fase ilustrada na Figura 4.7 e o plano da abertura não é tão grande, assim a fase é quase constante ao longo da abertura. Essa é a razão pela qual, para pequenos valores de ψ_h , a largura do feixe diminui e o ganho aumenta à medida que ψ_h aumenta. No entanto, para valores mais elevados de ψ_h , a diferença de fase entre um ponto da frente de fase e o plano da abertura é significativa e tem-se uma considerável diferença de fase ao longo da abertura. Neste caso o campo nas laterais da corneta estará fora de fase com o campo no centro, de forma que esses campos tenderão a se cancelar na região de campo distante. Assim, a partir do ângulo ótimo, qualquer aumento do ângulo de abertura tende a diminuir o ganho da antena.

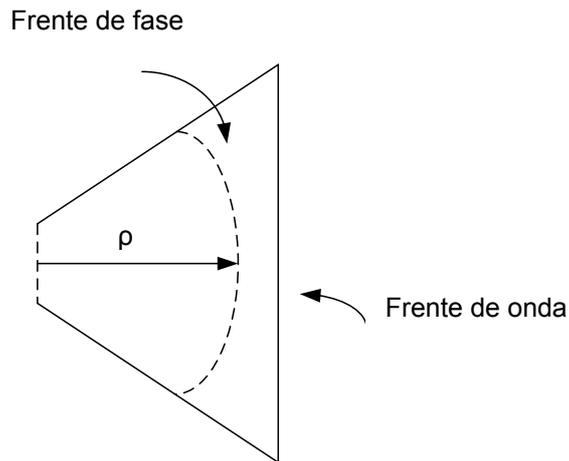


Figura 4.7 – Diferença entre a frente de fase e o plano da abertura

Outra informação importante pode ser visualizada na Figura 4.8. A figura ilustra o ângulo do feixe *versus* o ângulo de abertura, para diferentes valores de comprimento da corneta.

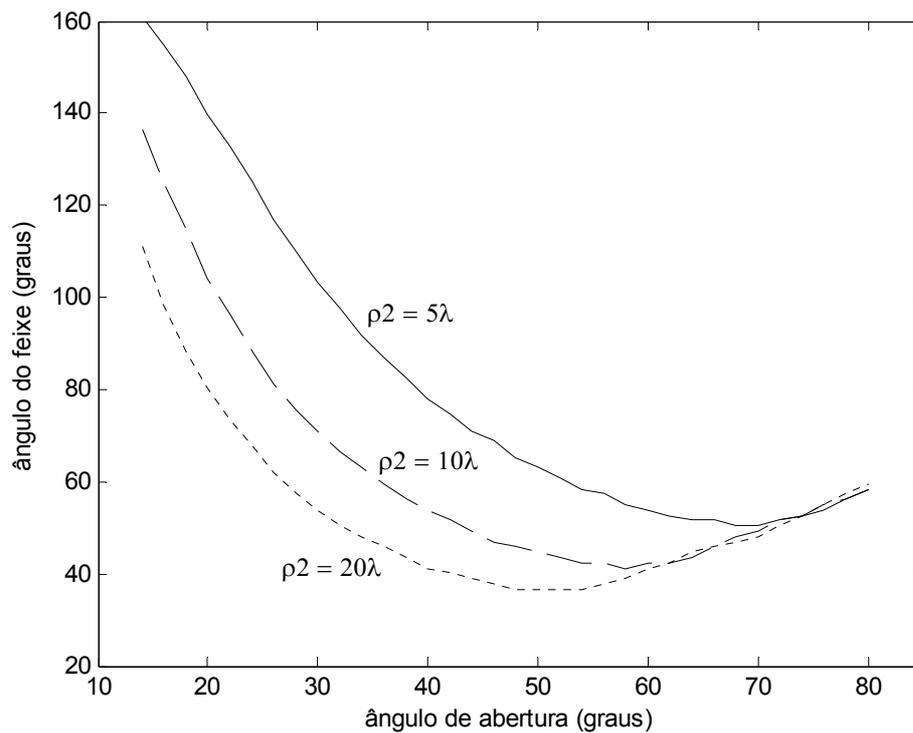


Figura 4.8 – Ângulo do feixe X ângulo de abertura para corneta piramidal no plano H

A partir dessas curvas e dos diagramas ilustrados nas Figuras 4.5 e 4.6, alguns pontos podem ser destacados:

1. Para um ângulo de abertura constante, a largura do feixe diminui com um aumento do comprimento da corneta.

2. Para um ângulo de abertura constante, há um comprimento da corneta específico a partir do qual a largura do feixe praticamente não se altera com aumentos adicionais do comprimento.
3. Para um comprimento da corneta constante, há sempre um ângulo de abertura ótimo para o qual a largura do feixe é mínima.
4. O ângulo de abertura ótimo diminui com o aumento do comprimento, assim como o ângulo de feixe mínimo correspondente.

As conclusões destacadas, baseadas em estudos teóricos, são validadas por resultados experimentais referentes às antenas cornetas. Resultados e dados experimentais podem ser encontrados na referência [19].

Os gráficos ilustrados nas Figuras 4.5, 4.6 e 4.8 estão em ótima concordância com resultados obtidos por outros autores [20], [21].

Os seguintes aspectos merecem destaque:

1. Dos diagramas ilustrados nas Figuras 4.5 e 4.6 podem ser derivadas as dimensões ótimas da antena para determinada aplicação. Essas dimensões ótimas são geralmente organizadas sob a forma de gráficos como funções do ângulo de expansão e comprimento da corneta juntamente com outras informações adicionais como largura de feixe e largura de feixe de meia potência. Gráficos desse tipo são amplamente utilizados na prática para auxílio na construção de antenas corneta [21].
2. Na construção das antenas corneta são levados em conta aspectos de ordem prática e econômica. Conforme a Figura 4.5, quanto maior o comprimento da antena, menor será a largura do feixe e maior o ganho da antena. Entretanto nem sempre é viável a construção de antenas de grande comprimento, seja por questões práticas ou econômicas. A solução comumente empregada é a construção de antenas de comprimentos menores com ângulos de abertura mais elevados o que, no entanto, acarretaria alguns problemas devido à diferença de fase. Nestes casos, é usual a instalação de lentes no interior da antena a fim de compensar a diferença de fase e manter o feixe estreito mesmo para ângulos de abertura mais elevados. Informações detalhadas sobre instalação a utilização de lentes em antenas corneta podem ser encontradas na referência [20].

4.4.2 – Análises físicas - Plano E

O diagrama de campo normalizado (em dB) no plano E para uma corneta piramidal de dimensões típicas é ilustrado na Figura 4.9. Pela figura pode-se ver que o diagrama da antena corneta no plano E possui lobos laterais consideravelmente maiores em relação ao diagrama no plano H. Esse comportamento é devido ao fato de que a distribuição de campo na abertura nesse plano é razoavelmente constante (no plano H a distribuição de campo é senoidal, conforme discutido anteriormente, sendo os lobos laterais muito menores). Tal fato é comprovado experimentalmente [21].

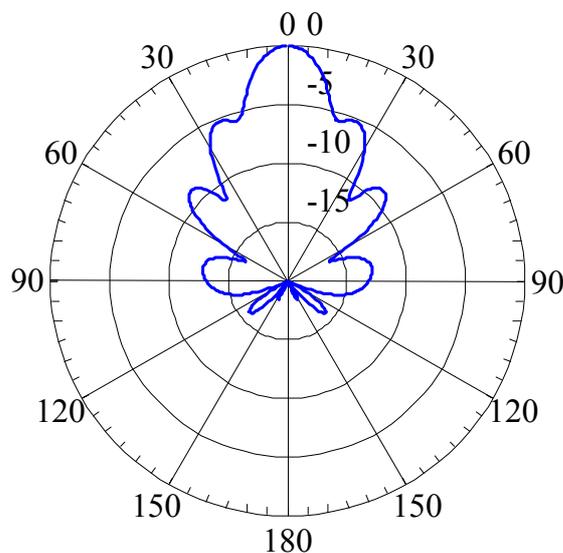


Figura 4.9 – Diagrama de campo - Plano E

($f = 2\text{GHz}$, $\rho_1 = \rho_2 = 100\text{cm}$, $a_1 = 60\text{cm}$, $b_1 = 50\text{cm}$)

Análises semelhantes às anteriores para o plano H foram realizadas para o plano E da corneta. O efeito da variação do comprimento da corneta na largura do feixe do diagrama de radiação é ilustrado na Figura 4.10, para um ângulo de abertura constante igual a $2\psi_e = 20^\circ$. O efeito da variação do ângulo de abertura para um comprimento da corneta constante, no caso $\frac{\rho_2}{\lambda} = 4$, é ilustrado na Figura 4.11. Pode-se observar que os diagramas de radiação computados para o plano E possuem comportamento físico, com relação à variação dos parâmetros, similar aos diagramas computados para o plano H. As principais diferenças residem nos lobos secundários que são mais intensos no plano E, tornando os diagramas desse plano mais irregulares em relação àqueles obtidos para o plano H.

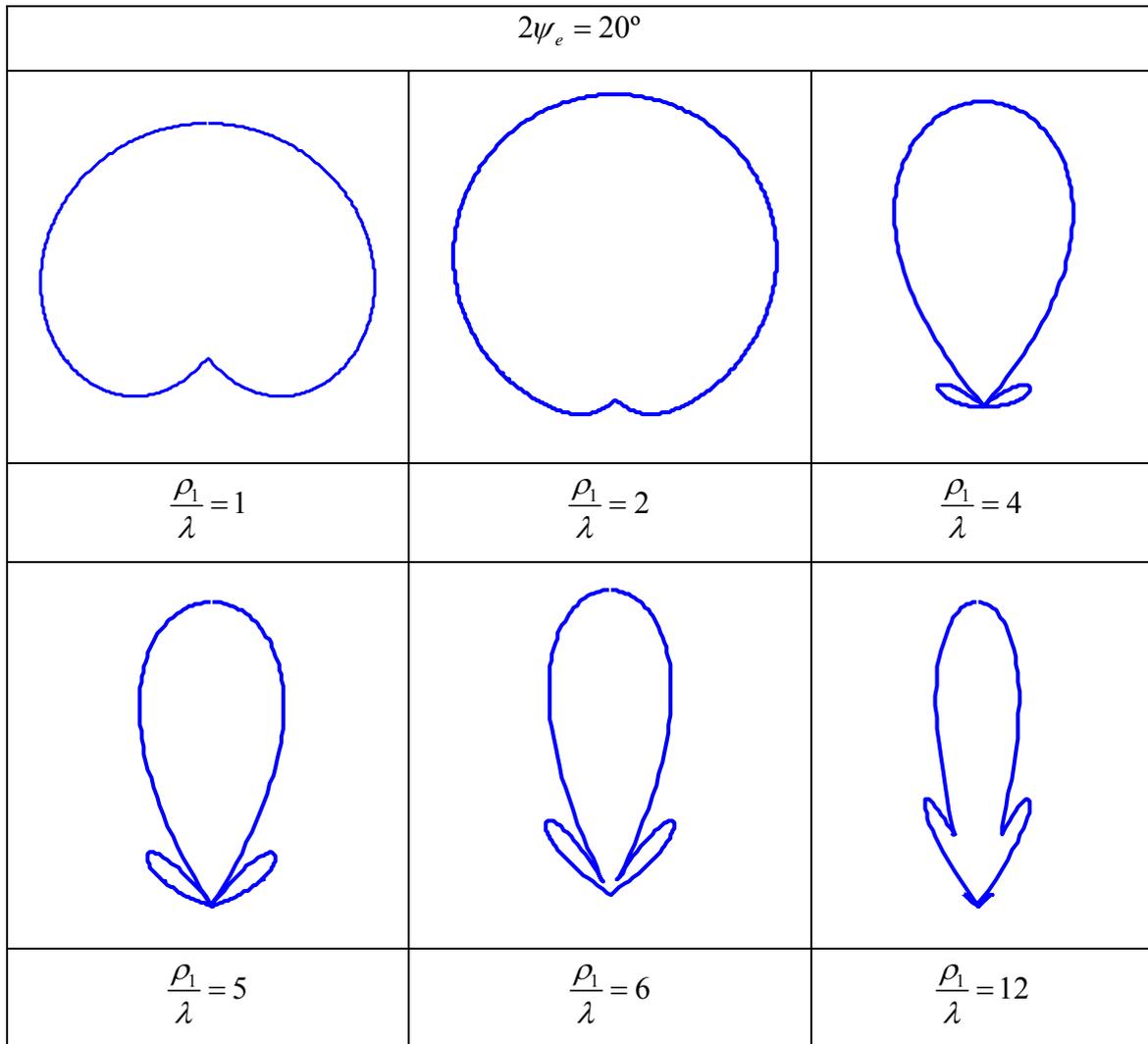


Figura 4.10 – Diagramas de radiação típicos da corneta no plano E para ângulo de abertura $2\psi_e = 20^\circ$ fixo e comprimento da corneta variável

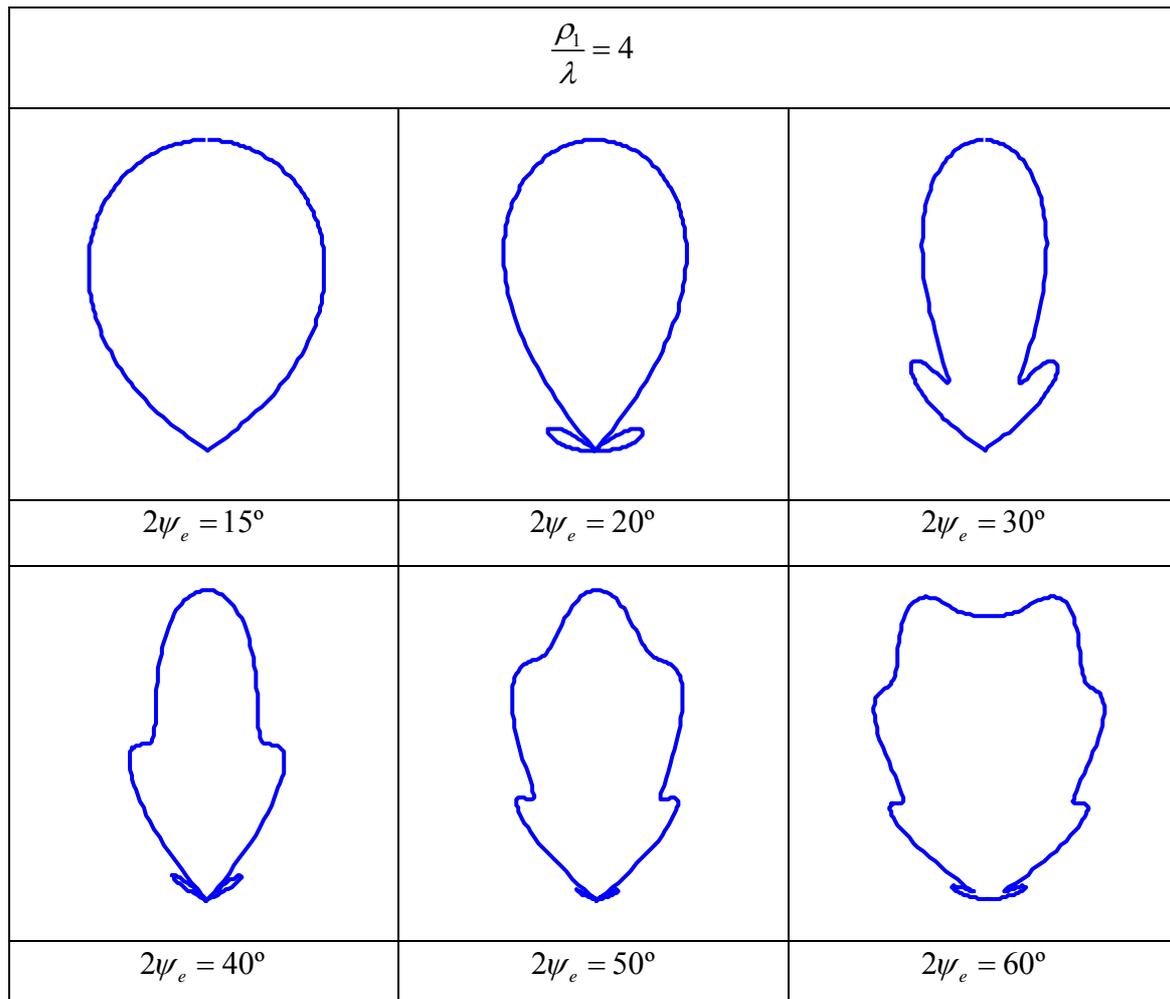


Figura 4.11 – Diagramas de radiação típicos da corneta no plano E para comprimento

da corneta constante $\frac{\rho_2}{\lambda} = 4$ e ângulo de abertura $2\psi_e$ variável

Os gráficos ilustrados nas Figuras 4.10 e 4.11 estão em ótima concordância com resultados obtidos por outros autores [20], [21].

4.4.3 – Diretividade

A diretividade é outro parâmetro de fundamental importância para construção de uma antena corneta. Ele indica a capacidade de uma antena em “direcionar” energia radiada numa determinada direção. Pode-se mostrar, a partir da definição matemática de diretividade e das equações de campo deduzidas (4.39)-(4.42), que a diretividade da antena corneta piramidal é dada por [4]:

$$D_p = \frac{4\pi U_{\max}}{P_{\text{rad}}} = \frac{8\pi\rho_1\rho_2}{a_1b_1} \left\{ [C(u) - C(v)]^2 + [S(u) - S(v)]^2 \right\} \times \left\{ C^2\left(\frac{b_1}{\sqrt{2\lambda\rho_1}}\right) + S^2\left(\frac{b_1}{\sqrt{2\lambda\rho_1}}\right) \right\} \quad (4.43)$$

onde

$$u = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{\sqrt{\lambda\rho_2}}{a_1} + \frac{a_1}{\sqrt{\lambda\rho_2}} \right) \quad (4.44)$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{\sqrt{\lambda\rho_2}}{a_1} - \frac{a_1}{\sqrt{\lambda\rho_2}} \right) \quad (4.45)$$

A expressão (4.43) é composta pelo produto de duas parcelas, uma relativa ao plano H e outra relativa ao plano E. Na expressão (4.43) o primeiro termo entre chaves é a diretividade do plano H e o segundo termo entre chaves é a diretividade do plano E.

Na prática, uma expressão bastante utilizada que segue o mesmo padrão da equação (4.43) é [22]:

$$D_p = \frac{\pi\lambda^2}{32ab} D_E D_H \quad (4.46)$$

onde a e b são as dimensões do guia, indicadas na figura 4.2 (a, b e c) e D_E e D_H são as diretividades do plano E e H, respectivamente, dadas por:

$$D_E = \frac{a}{\lambda} \frac{G_E}{\sqrt{\rho_e/\lambda}} \quad (4.47)$$

$$D_H = \frac{b}{\lambda} \frac{G_H}{\sqrt{\rho_h/\lambda}} \quad (4.48)$$

Essa é uma expressão bastante conhecida na prática e amplamente utilizada na construção de antenas corneta do tipo piramidal. O procedimento a ser seguido na determinação da diretividade a partir de (4.46) é o seguinte [22]:

1. Calcula-se:

$$A = \frac{a_1}{\lambda} \sqrt{\frac{50}{\rho_h / \lambda}} \quad (4.49)$$

$$B = \frac{b_1}{\lambda} \sqrt{\frac{50}{\rho_e / \lambda}} \quad (4.50)$$

2. Utilizando A e B, encontra-se os valores de G_H e G_E , respectivamente, nas Figuras 4.12 e 4.13. Caso os valores de A ou B sejam menores que 2, deve-se calcular G_H ou G_E por meio das expressões:

$$G_E = \frac{32}{\pi} B \quad (4.51)$$

$$G_H = \frac{32}{\pi} A \quad (4.52)$$

3. Obtidos os valores de G_H e G_E calcula-se as diretividades D_E e D_H a partir das expressões (4.47)-(4.48) e finalmente a diretividade da corneta piramidal por meio de (4.46).

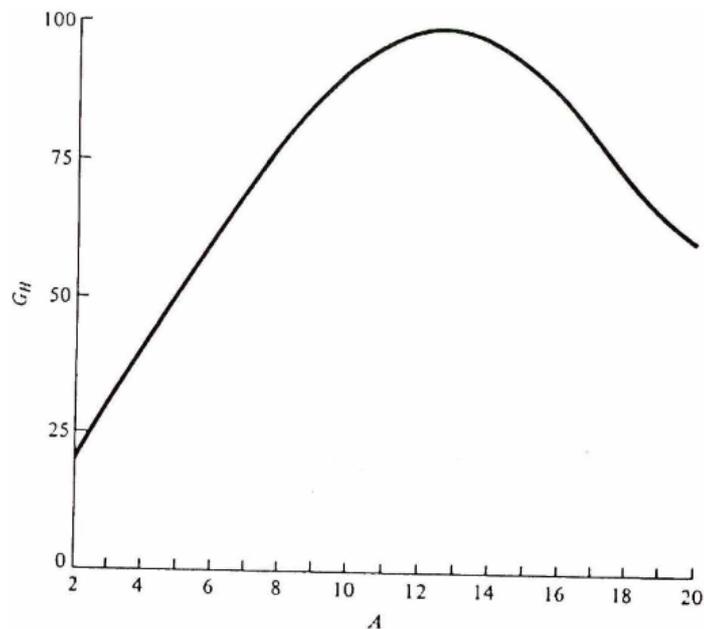


Figura 4.12 – G_H em função de A (fonte: *Antenna theory: analysis and design, Third Edition* [4])

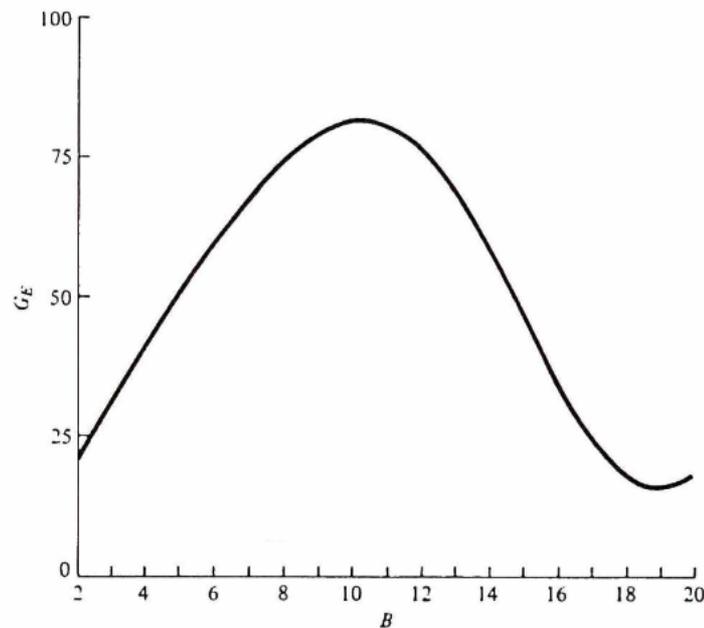


Figura 4.13 – G_E em função de B (fonte: *Antenna theory: analysis and design, Third Edition* [4])

4.4.4 – Resposta em frequência

A resposta da antena ao longo do espectro de frequência em que se deseja trabalhar é uma característica fundamental e que deve ser levada em conta no projeto da corneta. Para ilustrar o efeito da variação da frequência nos diagramas de radiação, foram realizadas simulações para uma mesma antena com quatro frequências diferentes.

Pode-se ver pela Figura 4.14, que com aumento da frequência há a introdução de lobos laterais nos diagramas de radiação e conseqüente perda de diretividade e ganho da corneta. Geralmente as antenas são construídas de forma a possuírem um diagrama de radiação razoável para frequência mais elevada da banda em que se deseja trabalhar, garantindo a correta operação nas demais frequências.

Os diagramas ilustrados na Figura 4.14 são particulares para corneta com as dimensões especificadas sendo que, para uma corneta com outras dimensões, têm-se um comportamento totalmente diferente. De forma geral, na prática, as antenas com aberturas de dimensões menores trabalham até frequências mais elevadas não sendo, entretanto, aplicáveis em baixas frequências. Antenas com aberturas maiores se comportam bem para frequências menores. Nos casos em que é necessária uma antena que trabalhe em baixas frequências, porém com dimensões reduzidas, a antena é preenchida com um dielétrico. A escolha de uma ou outra solução dependerá das características específicas de cada projeto.

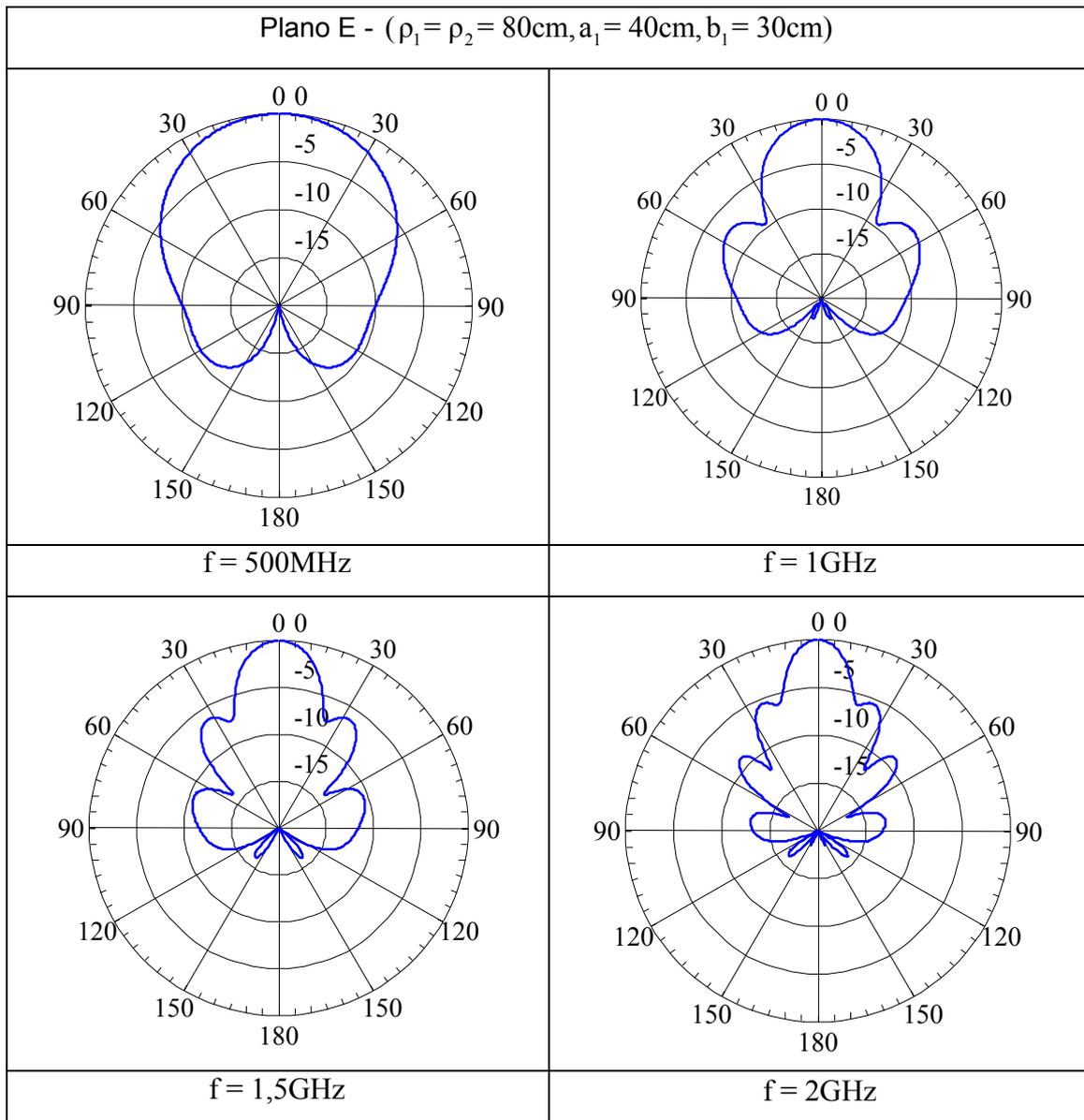


Figura 4.14 – Resposta em frequência da antena corneta

A Figura 4.15 ilustra dois diagramas de radiação 3D para uma antena corneta piramidal comercial (modelo ETS – 3106). Tais diagramas foram obtidos a partir do software “EMQuest™ Viewer” disponível no site do fabricante [23] e ilustram o mesmo efeito observado nos diagramas 2D da Figura 4.14. Pode-se observar pela Figura 4.15 que o diagrama para 500 MHz apresenta um lobo central bem definido. Para frequência de 2 GHz, o lobo principal dividiu-se em quatro lobos dominantes, além do surgimento de diversos lobos secundários. Comportamentos desse tipo no diagrama de radiação da antena devem ser verificados com atenção, principalmente em aplicações que exijam um feixe “bem comportado” na faixa de frequência como medições em ensaios de CEM e calibrações de outras antenas.

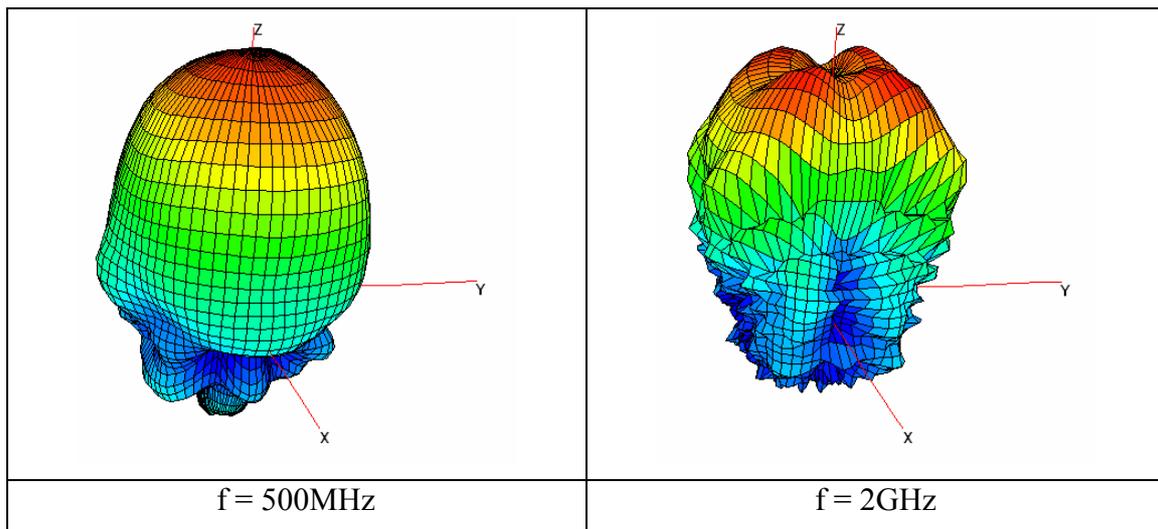


Figura 4.15 – Diagramas de radiação 3D para antena comercial ETS – 3106 (fonte: software EMQuestTM Viewer disponível no site do fabricante [24])

4.5 – Conclusões

A partir das equações de campo deduzidas para antena corneta piramidal foi implementado um algoritmo computacional. Uma análise física bastante ampla do comportamento geral dos campos irradiados por uma corneta piramidal foi realizada utilizando-se o algoritmo.

Para validação do programa desenvolvido, os resultados e diagramas obtidos foram comparados com dados experimentais disponíveis na literatura especializada e trabalhos de outros autores, sendo que uma ótima concordância foi observada. As principais conclusões com relação ao comportamento físico da corneta piramidal foram:

- Para um aumento do comprimento da corneta, tem-se um feixe mais estreito e um aumento do ganho da antena;
- Existe um ângulo de abertura ótimo, para um determinado comprimento de antena, em que a largura do feixe é mínima. Esse ângulo é tanto menor quanto maior for o comprimento da corneta;
- Para aumentos excessivos do ângulo de abertura observa-se perda no ganho devido às diferenças de fase na abertura da antena;
- Os diagramas de radiação do plano E apresentam lobos laterais consideravelmente maiores que os diagramas obtidos para o plano H;
- Considerando uma mesma antena, os diagramas de campo para frequências elevadas apresentam um número de lobos laterais bastante superior em relação aos diagramas de campo para frequências mais baixas.

CAPÍTULO 5 - SIMULAÇÕES E COMPARAÇÕES COM ANTENAS CORNETAS PIRAMIDAIS REAIS

5.1 – Introdução

As simulações e análises de sensibilidade realizadas no capítulo anterior permitiram uma compreensão física do comportamento dos campos irradiados por uma antena corneta além de servirem como forma de validação do algoritmo desenvolvido por meio de comparações com dados disponíveis na literatura especializada.

Este capítulo tem o objetivo de comparar os diagramas fornecidos pelo programa desenvolvido com diagramas de antenas cornetas piramidais reais. Dois modelos de antena são utilizados para esse fim, um modelo clássico (EMCO – 3160) e um modelo de banda larga com duplo cume (ETS – 3106).

5.2 – Antena corneta piramidal modelo EMCO – 3160

A antena corneta piramidal modelo EMCO – 3160 é uma série constituída de dez antenas cornetas do tipo piramidal clássica. As dez antenas da série são construídas utilizando os mesmos processos e materiais, porém com dimensões diferentes a fim de abranger uma banda de frequências de 1 a 40GHz. As antenas dessa série podem ser utilizadas como transmissoras ou receptoras na banda de frequência citada. Informações adicionais como ganho, resposta em frequência, potência, etc. podem ser encontradas no manual da antena [24]. A Figura 5.1 ilustra algumas antenas da série.



Figura 5.1 – Série EMCO – 3160 (fonte: manual do fabricante [24])

As dimensões e faixa de frequência correspondente a cada antena da série podem ser encontradas no manual e estão listadas na Tabela 1 [24]:

Tabela 1 – Dimensões das antenas da série EMCO – 3160

Modelo	Largura da abertura (cm)	Altura da abertura (cm)	Comprimento da antena (cm)	Banda de frequência (GHz)
3160-01	62,6	46,9	103,2	0,96 – 1,40
3160-02	52,8	39,6	88,3	1,12 – 1,70
3160-03	34,0	26,0	62,2	1,70 – 2,60
3160-04	23,5	17,5	53,3	2,60 – 3,95
3160-05	15,7	11,6	36,2	3,95 – 5,85
3160-06	11,6	8,6	30,5	5,85 – 8,20
3160-07	7,6	5,8	22,9	8,20 – 12,40
3160-08	5,1	3,8	15,9	12,40 – 18,00
3160-09	3,5	2,7	10,5	18,00 – 26,50
3160-10	2,5	1,8	9,5	26,50 – 40,00

5.2.1 – Simulações e comparações

Conhecidas as dimensões das antenas, conforme tabela 1, pode-se, por meio do algoritmo computacional desenvolvido no capítulo 4, plotar os diagramas de campo. Utilizando o programa foram realizadas simulações e os diagramas de radiação obtidos para alguns dos modelos da série foram comparados com os diagramas que constam no apêndice D do manual da antena [24]. As Figuras 5.18 a 5.23 ilustram os resultados obtidos.

A. Modelo 3160-01

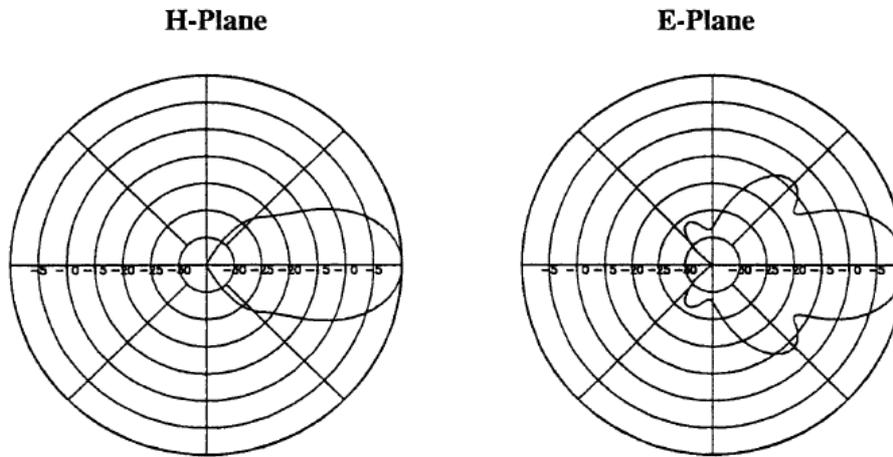


Figura 5.2 – Diagramas de radiação do modelo 3160-01 para $f = 1,2GHz$ (fonte: manual do fabricante [24])

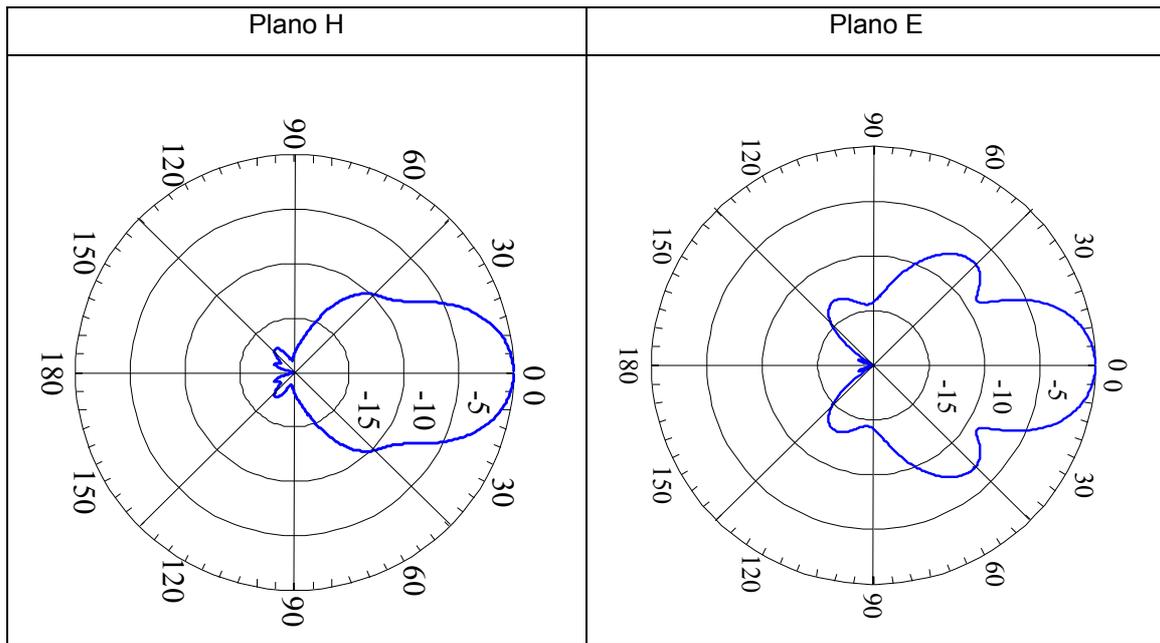


Figura 5.3 – Diagramas de radiação do modelo 3160-01 para $f = 1,2GHz$ (fonte: simulação)

B. Modelo 3160-04

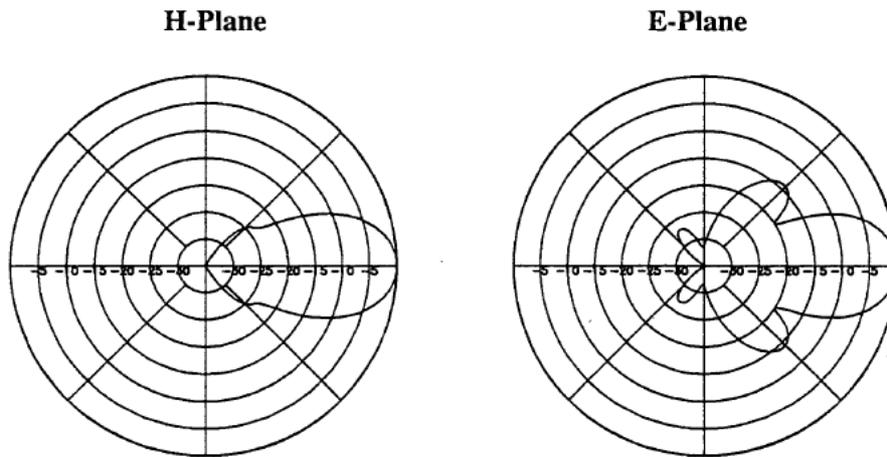


Figura 5.4 – Diagramas de radiação do modelo 3160-04 para $f = 3,3GHz$ (fonte: manual do fabricante [24])

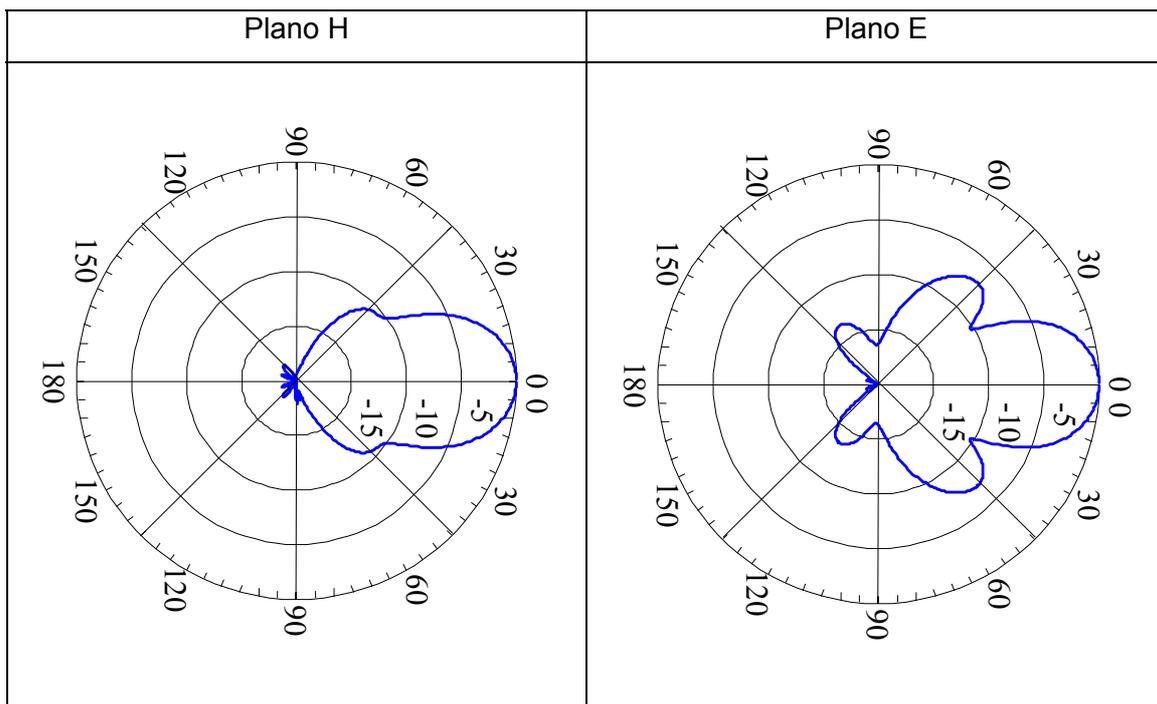


Figura 5.5 – Diagramas de radiação do modelo 3160-04 para $f = 3,3GHz$ (fonte: simulação)

C. Modelo 3160-09

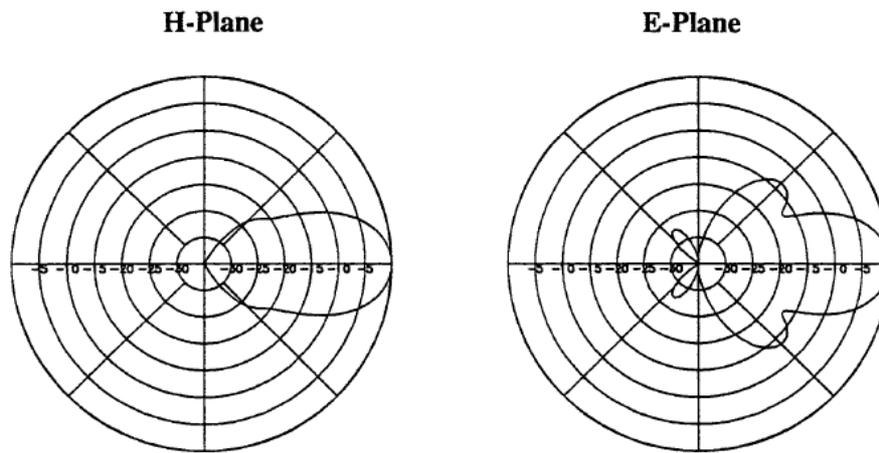


Figura 5.6 – Diagramas de radiação do modelo 3160-09 para $f = 22GHz$ (fonte: manual do fabricante [24])

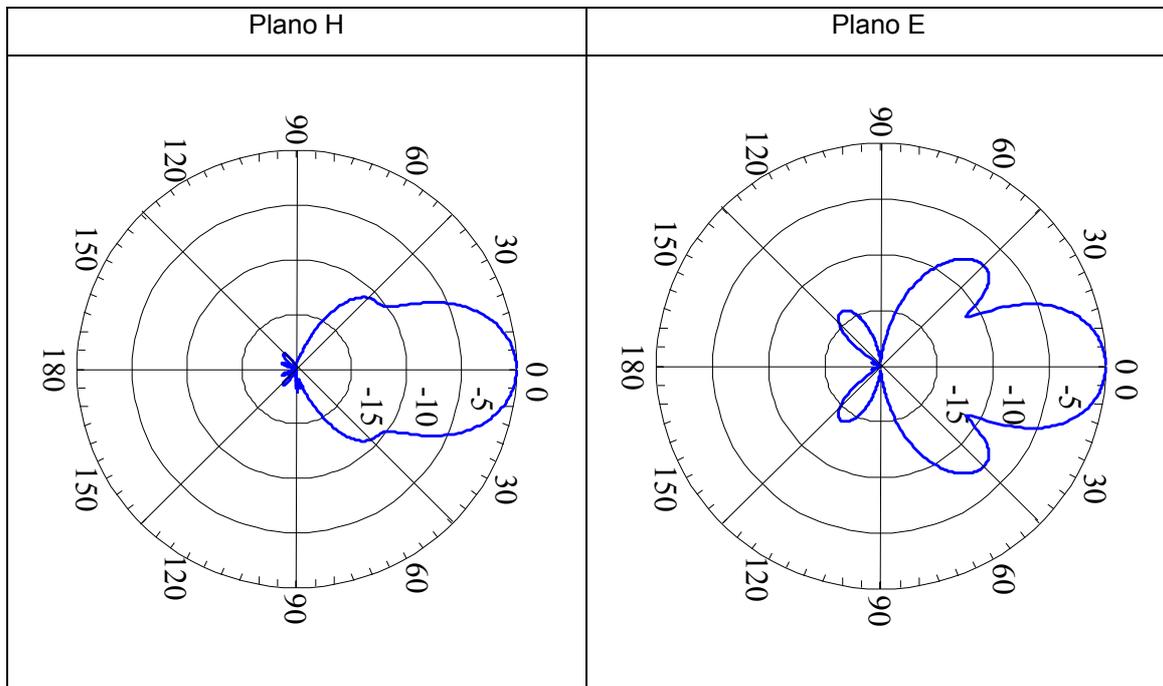


Figura 5.7 – Diagramas de radiação do modelo 3160-09 para $f = 22GHz$ (fonte: simulação)

5.2.2 – Análise dos resultados

Pode-se observar pelas Figuras 5.2-5.7, que, com exceção de alguns pequenos lobos secundários nos diagramas do plano H, os resultados estão em ótima concordância com os dados fornecidos pelo fabricante. As pequenas diferenças entre os diagramas práticos e simulados são devido às aproximações envolvidas nas deduções das equações de campo da corneta piramidal como, por exemplo, adoção

de campo zero fora da região da abertura, e a erros inerentes aos diagramas do fabricante.

5.3 – Antena corneta piramidal de faixa larga modelo ETS – 3106 com duplo cume

A antena corneta piramidal de faixa larga modelo ETS – 3106 com duplo cume (200 MHz – 2GHz) é uma antena robusta, com dimensões maiores que o modelo anterior (EMCO – 3160). Este tipo de antena possui uma grande gama de aplicações, podendo ser empregada em sistemas de telecomunicações e em ensaios de EMC. A corneta 3106 possui 98 cm de comprimento, 94 cm de largura e 73 cm de altura, conforme manual da antena [24]. Informações adicionais como ganho, resposta em frequência, potência, etc. podem ser encontradas no manual [24]. A Figura 5.8 ilustra a corneta 3106.

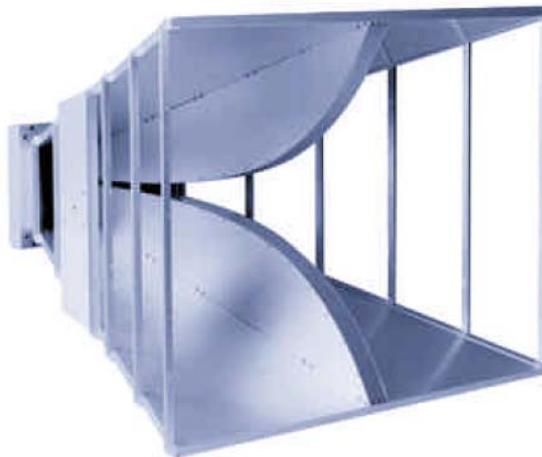


Figura 5.8 – Antena corneta piramidal modelo ETS - 3106 (fonte: manual do fabricante [24])

Os duplos cumes no interior da abertura, ilustrados na Figura 5.8, são utilizados para estender a faixa de frequência utilizável da antena. Os cumes, normalmente utilizados em guias de onda, têm o objetivo de abaixar a frequência de corte do modo fundamental expandindo a banda de atuação do primeiro modo antes que modos superiores ocorram. Este mesmo efeito é explorado nas antenas cornetas de duplo cume [3].

Conforme mencionado no Capítulo 4, cornetas de dimensões maiores (como é o caso da 3106) possuem bom comportamento para frequências mais baixas.

Entretanto, dependendo da aplicação, é desejável uma antena mais robusta que trabalhe com frequências mais elevadas. Nestes casos são utilizadas as antenas de banda larga com duplo cume, em que o duplo cume tem a função de “alargar” a banda de frequência da corneta, permitindo que se trabalhe com frequências as quais não seriam possíveis sem os cumes [3].

Pela Figura 5.8 pode-se ver que o modelo 3160 é diferente do modelo clássico para o qual foram deduzidas as equações de campo no Capítulo 4. Para utilização do algoritmo, algumas considerações serão feitas:

1. A antena, conforme Figura 5.8, é aberta nas laterais, o que não corresponde ao modelo clássico. Como antena trabalha em frequências relativamente baixas (máximo de 2GHz), o comprimento de onda é elevado (em relação às dimensões da antena) de forma que será considerado que a dispersão de campo eletromagnético pelas laterais da antena é mínima. Assim, a antena comporta-se como se fosse fechada.
2. Os cumes no centro da antena apenas alargam a banda de frequência da antena, não interferindo significativamente na distribuição dos campos na abertura.

5.3.1 – Simulações e comparações

Com base nas considerações anteriores e nas dimensões conhecidas da antena 3160, foram plotados, utilizando o algoritmo desenvolvido para corneta clássica, gráficos de intensidade de radiação *versus* ângulo theta. Os resultados são comparados com dados fornecidos pelo fabricante [24].

Para as figuras 5.9 a 5.15 adotou-se a seguinte nomenclatura para os diagramas plotados:

—— Fabricante - - - - Simulação

A. Resultados para frequências $f < 1GHz$

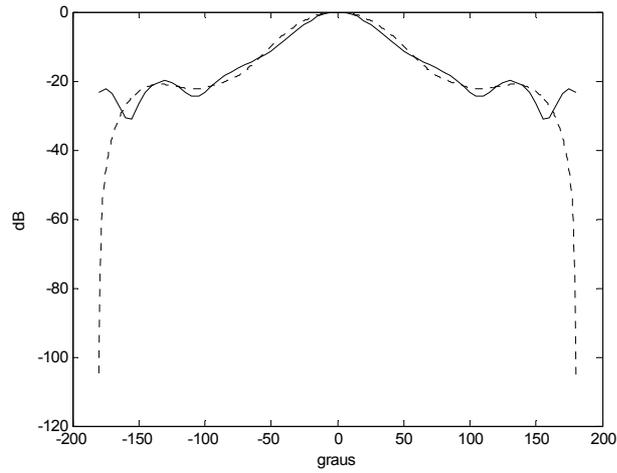


Figura 5.9 – Diagrama de radiação do Plano E da corneta para $f = 400MHz$

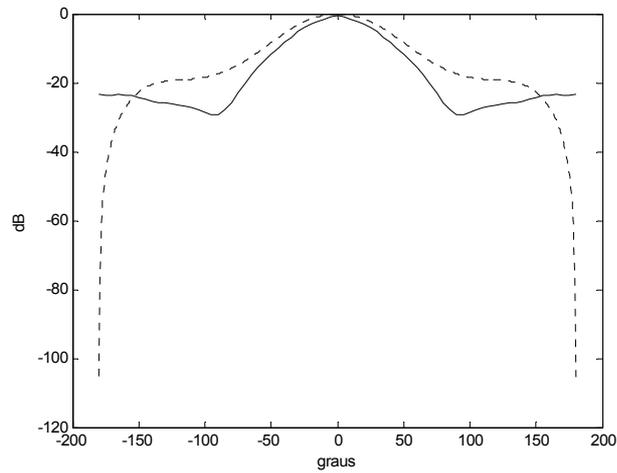


Figura 5.10 – Diagrama de radiação do Plano H da corneta para $f = 400MHz$

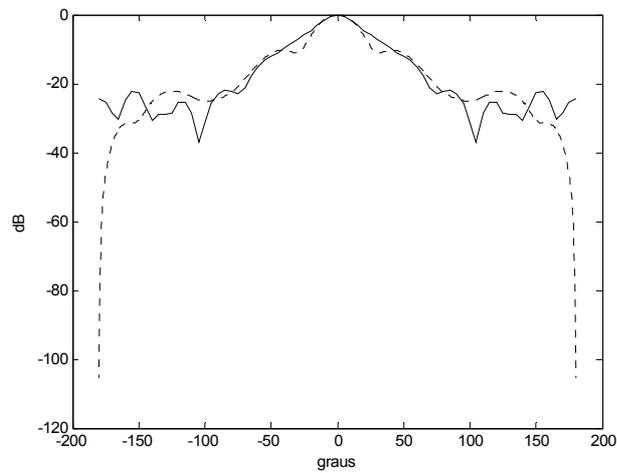


Figura 5.11 – Diagrama de radiação do Plano E da corneta para $f = 800MHz$

B. Resultados para frequências $f \geq 1GHz$

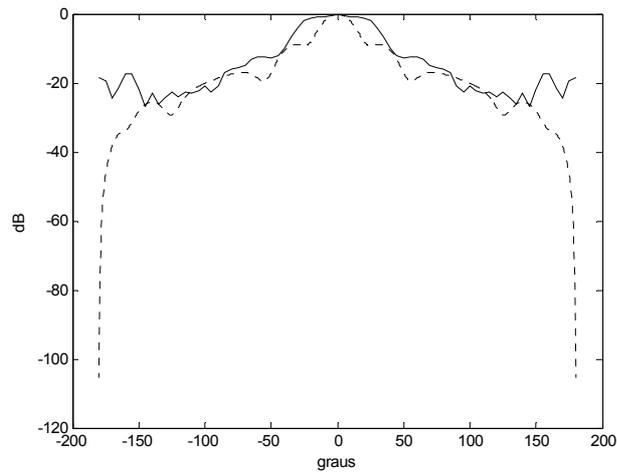


Figura 5.12 – Diagrama de radiação do Plano E da corneta para $f = 1GHz$

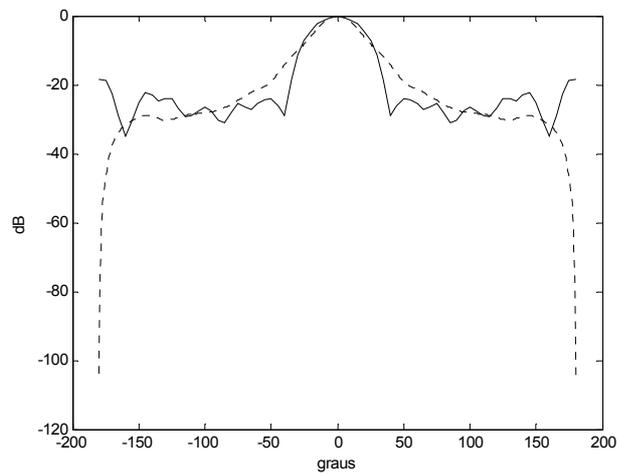


Figura 5.13 – Diagrama de radiação do Plano H da corneta para $f = 1GHz$

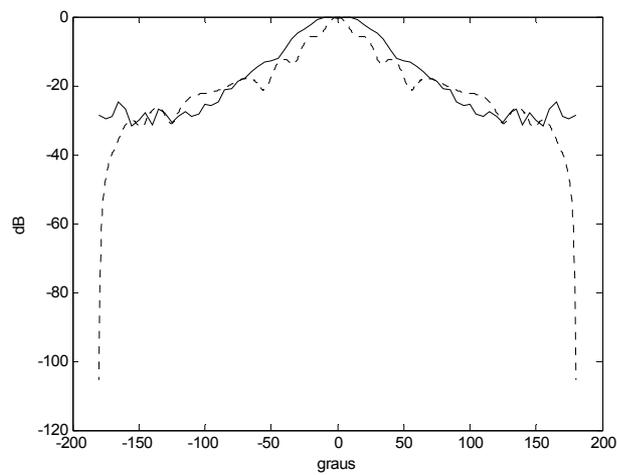


Figura 5.14 – Diagrama de radiação do Plano E da corneta para $f = 1,5GHz$

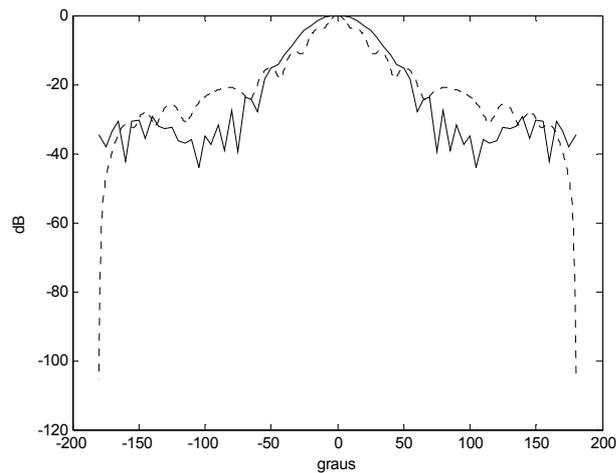


Figura 5.15 – Diagrama de radiação do Plano E da corneta para $f = 1,8GHz$.

5.3.2 – Análise dos resultados

Os resultados para frequências inferiores a 1GHz, Figuras 5.9 a 5.11, com exceção de algumas faixas de ângulo, apresentaram ótima concordância com os dados do fabricante. As discrepâncias nas bordas dos gráficos são devido à aproximação adotada na dedução das equações de campo em que se considera que o campo cai abruptamente para zero nas regiões fora da abertura.

Para frequências superiores a 1GHz, Figuras 5.12 a 5.15, também foi obtida uma boa concordância com os dados do fabricante, entretanto os erros observados foram mais elevados. As discrepâncias nas bordas dos gráficos aqui observadas também são devidas as aproximações adotadas nas deduções dos campos.

Conforme mencionado no Capítulo 4, para um aumento da frequência observa-se o aparecimento de lobos secundários e conseqüente perda de ganho da antena. O aumento dos lobos secundários pode ser observado nas figuras 5.9 a 5.15, à medida que a frequência aumenta. A Figura 5.16 ilustra dois diagramas de radiação 3D para ETS – 3106 obtidos a partir do software “EMQuest™ Viewer”, disponível no site do fabricante [23]. Vê-se claramente a diminuição do ganho entre os diagramas ilustrados para 800MHz e 2GHz, sendo que o lobo dominante presente no diagrama de 800MHz dividiu-se em quatro lobos iguais em torno do ângulo 0° no diagrama de 2GHz. Nos diagramas 2D no plano H ou E apenas observa-se uma diminuição no ganho das antenas sendo de difícil percepção esses lobos em torno do ângulo 0°. Para melhor visualização, realizou-se uma simulação para $\phi = 45^\circ$, ilustrada na Figura 5.17, em que se pode observar claramente os lobos laterais e a perda de ganho na direção do ângulo 0°.

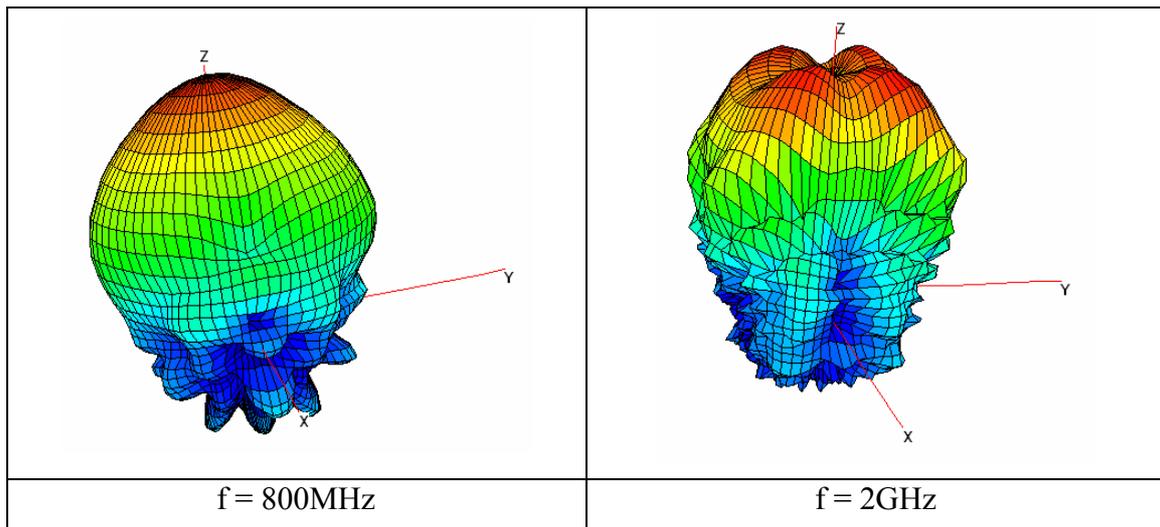


Figura 5.16 – Diagramas de radiação 3D para antena ETS – 3106 (fonte: software EMQuest™ Viewer disponível no site do fabricante [24])

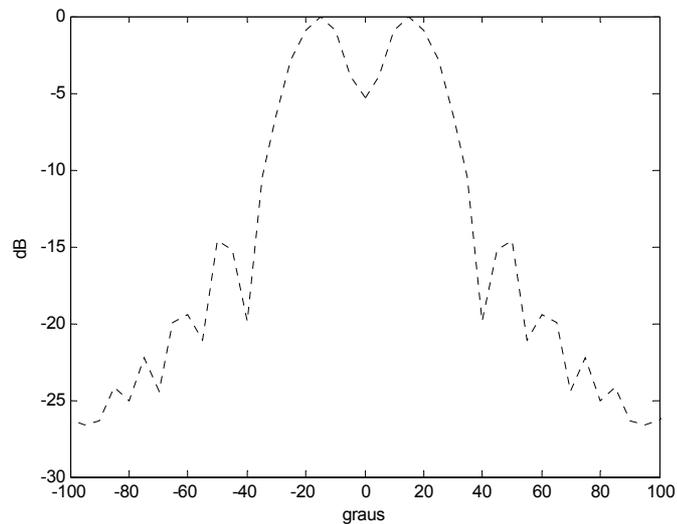


Figura 5.17 - Diagrama de radiação para $\phi = 45^\circ$ da corneta para $f = 2\text{GHz}$

Pesquisas atuais indicam que o fenômeno da diminuição do ganho para frequências mais elevadas está relacionado com aparecimento de modos de propagação de ordem mais elevada, o que torna a distribuição de campo na abertura mais complexa [3]. Isto explica os piores resultados encontrados nas simulações para frequências mais elevadas, pois nas deduções das equações de campo da corneta, considera-se apenas o primeiro modo de propagação (TE_{10}).

5.4 – Conclusões

Foram realizadas comparações entre resultados fornecidos pelo algoritmo desenvolvido no capítulo 4 deste trabalho e dados de duas cornetas piramidais reais, uma corneta piramidal clássica e uma corneta piramidal de banda larga.

Os resultados obtidos para corneta clássica apresentaram ótima concordância com os dados fornecidos pelo fabricante, sendo que as pequenas diferenças identificadas são devidas às aproximações adotadas na dedução das equações de campo e erros experimentais.

Os resultados obtidos para corneta de banda larga também apresentaram uma boa concordância com os dados fornecidos pelo fabricante, sendo que as principais diferenças observadas foram devido às aproximações nas deduções das equações de campo e considerações feitas para utilização do modelo clássico para antena de banda larga.

O modelo matemático empregado juntamente com o algoritmo computacional desenvolvido mostrou ser fisicamente consistente sendo uma ferramenta poderosa para computo e estudo dos campos irradiados por antena corneta piramidal. Os resultados aqui obtidos, juntamente com aqueles do capítulo 4, podem servir de base para trabalhos que envolvam as cornetas piramidais, como ensaios de EMC, análise de aspectos construtivos e testes de sensibilidade.

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES

6.1 – Introdução

Os principais resultados concernentes a este Trabalho de Graduação podem ser divididos basicamente em duas realizações.

A primeira consiste na proposição de um modelo físico e matemático para antena corneta do tipo piramidal e posterior implementação computacional das equações de campo baseadas nesse modelo. A partir do algoritmo desenvolvido uma completa análise física da corneta piramidal foi realizada. Os resultados das análises foram comparados com dados disponíveis na literatura especializada e estudos de outros pesquisadores.

A segunda realização consiste, utilizando o modelo e algoritmo desenvolvidos anteriormente, na comparação entre diagramas de radiação simulados no programa e diagramas de radiação reais fornecidos por fabricantes de antenas cornetas piramidais. As simulações contemplaram dois modelos diferentes de antena, sendo um modelo clássico e um modelo de banda larga. Tais desenvolvimentos incluíram análises dos resultados e sugestões de melhorias do modelo empregado.

6.2 – Resultados alcançados

As análises físicas realizadas ao longo do Capítulo 4 evidenciaram alguns resultados interessantes com relação aos aspectos construtivos das antenas cornetas piramidais e comportamento dos campos irradiados:

1. Considerando um ângulo de abertura constante da corneta, aumentando-se o comprimento da antena, obtêm-se diagramas de campo com largura do feixe menores, o que caracteriza um aumento do ganho.
2. Para um ângulo de abertura constante da corneta, há um comprimento específico a partir do qual a largura do feixe praticamente não sofre alterações com aumentos adicionais no comprimento da corneta.

3. Pode-se observar que, para um comprimento da corneta constante, à medida que o ângulo de abertura cresce, a largura do feixe diminui e depois aumenta novamente.
4. Para um determinado comprimento da antena constante, há sempre um ângulo de abertura ótimo para o qual a largura do feixe é mínima.
5. O ângulo de abertura ótimo diminui com o aumento do comprimento, assim como o ângulo do feixe mínimo correspondente.
6. Para aumentos excessivos do ângulo de abertura observa-se a diminuição do ganho da corneta, devido às diferenças de fase na abertura da antena.
7. O diagrama de campo do plano E apresenta lobos laterais consideravelmente maiores que o diagrama de campo do plano H. Esse comportamento é devido ao fato de que a distribuição de campo na abertura do plano E é razoavelmente constante, enquanto que no plano H a distribuição de campo é senoidal.
8. Considerando uma mesma antena corneta, com o aumento da frequência é observado o aparecimento de lobos secundários o que caracteriza uma diminuição do ganho da antena.

Os resultados das análises físicas foram comparados com dados experimentais e estudos de outros pesquisadores da área, sendo que uma ótima concordância foi observada.

Os resultados descritos anteriormente evidenciam informações com relação aos aspectos construtivos das cornetas piramidais que são fundamentais para os fabricantes de antenas. O algoritmo desenvolvido pode auxiliar na determinação das dimensões ótimas da corneta a fim de otimizar seu desempenho. Outras informações oriundas do algoritmo como direção do feixe, intensidade dos lobos secundários e resposta em frequência são fundamentais para escolha de determinada antena para um ensaio de EMC.

Portanto, tendo em vista a discussão acima, os resultados obtidos no Capítulo 4 juntamente o algoritmo desenvolvido podem subsidiar os fabricantes com relação aos aspectos construtivos das antenas bem como orientar a escolha da melhor antena para determinado ensaio de EMC.

Com relação à comparação entre resultados utilizando o modelo sugerido e resultados advindos de antenas cornetas piramidais reais, no Capítulo 5 são apresentadas algumas análises. Para fins de comparação, duas cornetas foram

utilizadas, uma piramidal clássica e uma piramidal de banda larga. Os diagramas gerados por meio do algoritmo foram comparados com dados fornecidos pelos fabricantes das antenas. Da análise das comparações, os seguintes pontos principais foram evidenciados:

1. Os resultados obtidos para a piramidal clássica por meio do algoritmo apresentaram ótima concordância com os dados fornecidos pelo fabricante.
2. Para utilização do algoritmo para simulação dos diagramas da corneta de banda larga fez-se duas considerações: A) A antena trabalha em frequências relativamente baixas, de forma que não há fuga de campo pelas laterais da antena e B) Os cumes não alteram de forma significativa a distribuição de campos na abertura.
3. Os resultados obtidos para piramidal de banda larga através do algoritmo apresentaram uma boa concordância com os dados fornecidos pelo fabricante, principalmente para frequências mais baixas, mostrando serem as considerações fisicamente consistentes.
4. Os resultados com maiores erros para piramidal de banda larga foram observados para frequência mais elevada da antena;
5. Em todos os diagramas simulados observou-se uma ótima concordância entre dados simulados e do fabricante com relação aos lobos principais.
6. A consideração de que os campos são iguais a zero fora da região da abertura mostrou-se fisicamente pouco consistente.

O modelo eletromagnético sugerido juntamente com o algoritmo desenvolvido mostrou-se consistente para cômputo e simulação dos campos de antenas corneta piramidais reais clássicas.

A utilização do modelo clássico para piramidal de banda larga mostrou-se consistente para uma determinada faixa de frequência, apresentando bons resultados. Em todos os diagramas simulados observou-se uma boa concordância dos lobos principais em relação aos diagramas do fabricante. A aproximação de campo igual a zero na região fora da abertura mostrou-se fisicamente pouco consistente o que sugere correções ou melhoramentos para resultados mais precisos.

O algoritmo desenvolvido pode servir de base para trabalhos futuros na área de EMC. Pode ainda auxiliar no cálculo e estudo do comportamento dos campos irradiados por cornetas piramidais, subsidiando ensaios de EMC.

6.3 – Propostas de continuidade

Os diversos desenvolvimentos realizados neste trabalho proporcionaram a abertura para diversas atividades posteriores. Tendo em vista os resultados obtidos as seguintes melhorias no modelo empregado e aprofundamentos são sugeridos:

1. Consideração dos efeitos de difração nas bordas, ou seja, não adoção de campo igual zero na região fora da abertura;
2. Estudo dos modos de propagação mais elevados e sua relação com a resposta em frequência da antena corneta;
3. Estudo detalhado do efeito dos cumes nas antenas cornetas;
4. Desenvolvimento de um modelo eletromagnético específico para antena corneta de banda larga com duplo cume.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. J. Delaballe, "***A compatibilidade eletromagnética, os cuidados com a instalação, normas e ensaios***", Revista Eletricidade Moderna, Aranda, São Paulo, novembro de 2003, pp. 136-165.
- [2]. K. Liu *et al.*, "***Analysis of pyramidal horn antennas using moment methods***", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 41, nº10, Outubro 1993, pp. 1379-1389.
- [3]. C. Burns, P. Leuchtman, R. Vahldieck, "***Analysis and Simulation of a 1-18-GHz Broadband Double-Ridged Horn Antenna***", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 45, nº1, Fevereiro 2003, pp. 55-60.
- [4]. C. A. Balanis, "***Antenna theory: analysis and design, Third Edition***". J. Wiley, New York, 2005.
- [5]. A. W. Love, "***Electromagnetic Horn Antennas***", IEE Press, New York, 1976.
- [6]. C. A. Balanis, "***Horn Antennas,***" Chapter 8 in ***Antenna Handbook: Theory, Applications and Design*** (Y. T. Lo and S. W. Lee, eds.), Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1988.
- [7]. A. W. Love, "***Horn Antennas,***" Chapter 15 in ***Antenna Engineering Handbook*** (R. C. Johnson and H. Jasik, eds.), New York, 1984.
- [8]. J.S. Hey, "***The Evolution of Radio Astronomy***" (New York: Neale Watson Academic Publications, Inc., 1973), pp. 98-99.
- [9]. S. Aaronson, "***The Light of Creation: An Interview with Arno A. Penzias and Robert W. Wilson***", *Bell Laboratories Record*, Janeiro 1979, pp. 12-18.

- [10]. T. Milligan, "**A Design Study for the Basic TEM Horn Antenna**", IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 46, nº 1, Fevereiro 2004, pp. 86-92.
- [11]. M. J. Maybell, P. S. Simon, "**Pyramidal Horn Gain Calculations with Improved Accuracy**", IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 41, nº 7, Julho 1993, pp. 884-889.
- [12]. K. L. Shlager, G. S. Smith, and J. G. Maloney, "**Accurate Analysis of TEM Horn Antennas for Pulse Radiation**", IEEE Transactions on Elettromagnetic Compatibility, EMC-38, n.3, Agosto 1996, pp. 414-423.
- [13]. **Technical Papers**, disponível em: <http://www.ets-lindgren.com>.
- [14]. C. A. Balanis, "**Advanced Engineering Electromagnetics**", J. Wiley, New York, 1989.
- [15]. William J. Thompson, "**Atlas for computing mathematical functions: a illustrated guide for practitioner, with programs in C and Mathematica**", New York, Wiley, 1997.
- [16]. M. Abramowitz and I. A. Stegun, "**Handbook of Mathematical Functions**", National Bureau of Standarts, United States Dept. of Commerce, June 1964.
- [17]. W. L. Barrow, L. J. Chu, "**Theory of the Electromagnetic Horn**", Proc. IRE, vol. 27, Janeiro 1939, pp. 51-64.
- [18]. L. J. Chu, W. L. Barrow, "**Electromagnetic Horn Design**", Trans. AIEE, vol. 58, Julho 1939, pp. 333-338.
- [19]. D. R. Rhodes, "**A experimental Investigation of the Radiation Patterns of Electromagnetic Horn Antennas**", Proc. IRE, vol. 36, Setembro 1948, pp. 1101-1105.

-
- [20]. R. E. Collin, F. J. Zucker, "**Antenna Theory Part 1**", McGraw-Hill Book Company, Nova York, 1969.
- [21]. J. D. Kraus, "**Antenas**", Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1983.
- [22]. E. H. Braun, "**Some Data for the Design of Eletromagnetic Horns**", IRE Trans. Antennas Propagation, Vol. 4, nº 1, Janeiro 1956, pp. 29-31.
- [23]. **EMQuest™ Viewer**, disponível em: <http://www.ets-lindgren.com>.
- [24]. **Manuals**, disponível em: <http://www.ets-lindgren.com>.