

## 5 Resultados Numéricos

### 5.1. Considerações Preliminares

Resultados numéricos obtidos através da aplicação do modelo de análise *FE-BI* desenvolvido no capítulo 4 serão aqui apresentados.

Inicialmente serão determinadas freqüências de ressonância de cavidades cilíndricas e retangulares.

A determinação destas freqüências de ressonância, como será mostrado no item 5.2, oferece a oportunidade de testar a correção de parte do modelo computacional elaborado para análise de antenas espirais.

A seguir serão analisadas antenas tipo fenda retangular em cavidade cilíndrica.

O modelo computacional é o mesmo a ser utilizado em antenas espirais, constituindo assim, em uma análise de antenas tipo fenda para uma aplicação do modelo a uma geometria de abertura mais simples.

Finalmente, no item 5.4 serão apresentados os resultados para antenas espirais.

### 5.2. Freqüências Ressonantes em Cavidades

Se na formulação do item 3.1.3.1, a cavidade for considerada completamente fechada (ausência de abertura), as equações 3.28 e 3.29 assumem a forma:

$$\sum_{e=1}^M [A^e] \{E_j^e\} - k_c^2 \sum_{e=1}^M [B^e] \{E_j^e\} = \{0\} \quad (5.1)$$

onde:

$k_c$  são os números de onda correspondentes às freqüências de ressonância da cavidade,

$$A_{ij}^e = \int_{v^e} (\nabla \times \bar{W}_i^e) \cdot (\nabla \times \bar{W}_j^e) dv \quad (5.2 a)$$

$$B_{ij}^e = \int_{v^e} \bar{W}_i^e \cdot \bar{W}_j^e dv \quad (5.2 b)$$

O cálculo de  $k_c$ , a partir de (5.1) é um problema de autofunções e autovalores generalizado, onde foi utilizada uma subrotina da biblioteca IMSL para determiná-los.

Foram elaborados dois programas para o cálculo de freqüências ressonantes: *CAVQ* (para cavidades retangulares) e *CAVT* (para cavidades cilíndricas).

O programa *CAVQ* foi utilizado para se determinar as freqüências de ressonância de uma cavidade retangular metálica com dimensões 10 mm de comprimento, 5 mm de largura e 7,5 mm de altura.

Uma malha bidimensional composta por quadriláteros foi criada, e repetida ao longo da altura da cavidade, determinando assim a discretização da mesma em hexaedros retangulares.

Na figura 5.1 é apresentada a vista superior da cavidade examinada:

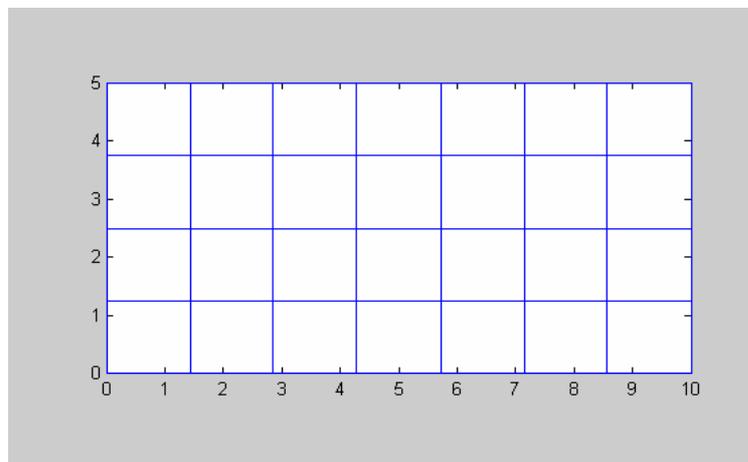


Figura 5.1 - Vista Superior da cavidade retangular discretizada por hexaedros retangulares.

Com estas dimensões, há um total de 140 hexaedros distribuídos em 5 camadas, resultando em 270 incógnitas.

Na tabela 5.1 encontram-se os três primeiros valores das freqüências de ressonância, correspondentes aos três primeiros modos, e os valores exatos para essas freqüências, calculados analiticamente:

Modo	Freqüência de Ressonância [GHz] (Valor Exato)	Freqüência de Ressonância [GHz] (Valor Computado)	ERRO [%]
TE111	25.032	25.318	0.6
TM110	33.535	34.299	1.6
TE011	36.067	36.879	1.7

Tabela 5.1 – Valores exatos e calculados numericamente de freqüências de ressonância para uma cavidade retangular.

Como segundo exemplo, calculou-se, com o auxílio do programa *CAVT*, as freqüências de ressonância de uma cavidade cilíndrica circular metálica cujo raio e altura são iguais a 10 mm.

Para este caso, triângulos que se assemelhassem a triângulos equiláteros foram traçados de modo a formar uma malha bidimensional. Esta por sua vez, se estendeu ao longo da altura da cavidade determinando a discretização da mesma.

A vista superior da malha construída para esta cavidade, composta por prismas triangulares, é apresentada na figura 5.2.

Com estas dimensões, há um total de 372 prismas distribuídos em 4 camadas, resultando em 528 incógnitas.

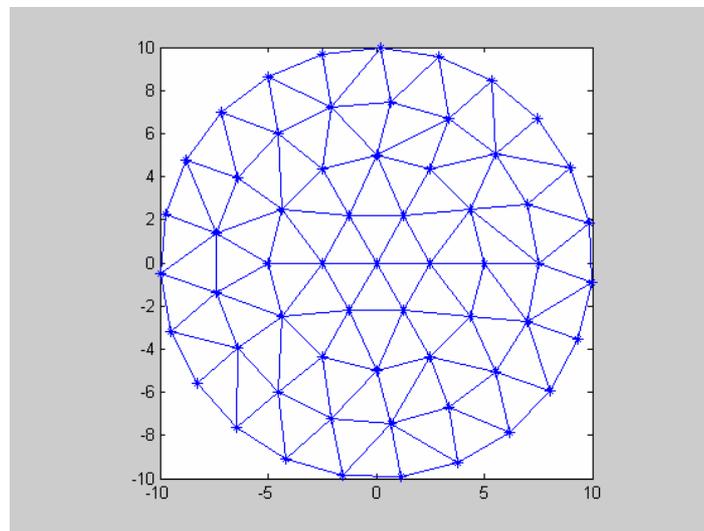


Figura 5.2 - Vista Superior da cavidade cilíndrica discretizada por prismas.

Na tabela 5.2 encontram-se os três primeiros valores, correspondentes aos três primeiros modos dos autovalores e freqüências de ressonância calculados e computados.

<b>Modo</b>	<b>Freqüência de Ressonância [GHz] (Valor Exato)</b>	<b>Freqüência de Ressonância [GHz] (Valor Computado)</b>	<b>ERRO [%]</b>
<b>TM010</b>	11.465	11.608	0.3
<b>TE111</b>	17.388	17.723	0.7
<b>TM110</b>	18.296	17.770	-1.1

Tabela 5.1 - Valores exatos e calculados numericamente de freqüências de ressonância para uma cavidade cilíndrica.

Para modos além do terceiro, verificou-se um aumento no erro. A fim de contornar o problema, poder-se-ia aumentar o número de elementos na discretização, porém isso acarretaria um aumento no número de incógnitas e maior trabalho computacional.

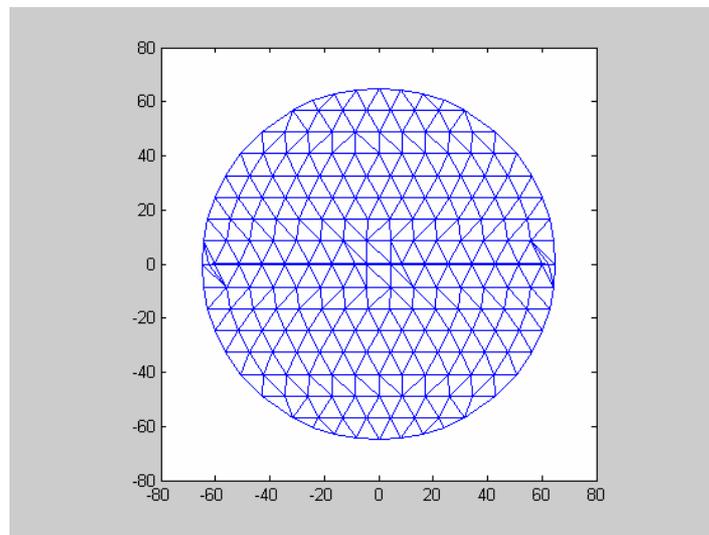
Os resultados mostrados nas tabelas 5.1 e 5.2 indicam a correção da parte dos programas de análise de antenas a serem apresentados a seguir, no que concerne à determinação de campos no interior da cavidade, pelo método dos elementos finitos.

### 5.3. Resultados para Antenas do Tipo Fenda Retangular

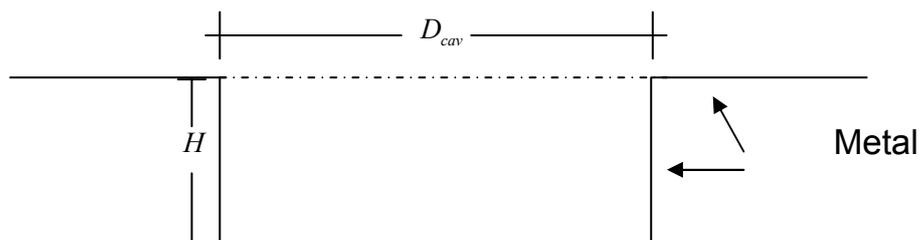
A antena tipo fenda retangular a ser examinada, tem como dimensões 120.0 mm de comprimento ( $L$ ) e 0.762 mm de largura ( $w$ ) e encontra-se apoiada numa cavidade cilíndrica circular metálica de altura ( $H$ ) 4.0 mm e diâmetro ( $D_{cav}$ ) 130.0 mm.

Na discretização do problema, procurou-se formar elementos cujas arestas fossem da ordem de 0.1 comprimento de onda, exceto na faixa de frequências de 0.7 GHz a 1GHz, em que arestas da ordem de 0.05 comprimento de onda foram utilizadas.

Para a geometria em questão, um exemplo da malha encontra-se ilustrada na figura 5.3:



(a)



(b)

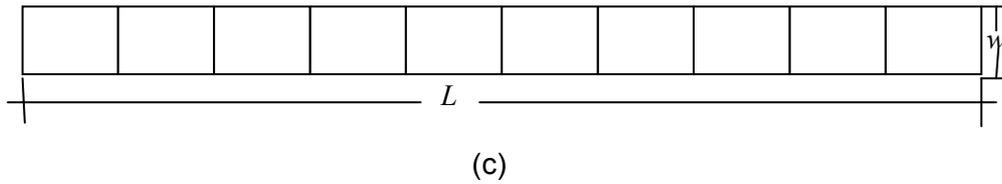


Figura 5.3 – Vista superior (a) e vista lateral (b) da antena tipo fenda retangular discretizada por prismas e hexaedros, em 3.5 GHz. (c) detalhe da fenda retangular discretizada.

Devido à mínima largura da fenda, esta não pode ser visualizada pela figura 5.3 (a), porém é importante notar que a mesma foi dividida em quadriláteros como pode ser exemplificado pela figura 5.3 (c), enquanto que a parte metálica da antena foi discretizada em triângulos constituindo assim a malha bidimensional.

Esta malha, se estende ao longo da altura da cavidade, resultando em uma malha de prismas e hexaedros.

Para esta frequência de 3.5 GHz, há na cavidade 15 hexaedros e 396 prismas distribuídos em 1 camada, gerando ao final 204 incógnitas.

Através dos diagramas de radiação encontrados nas figuras 5.4 a 5.9, observa-se que o método atende as expectativas.

Os diagramas demonstram o comportamento de uma antena tipo fenda retangular.

À medida que a frequência aumenta, e a dimensão da fenda se aproxima de um comprimento de onda,  $\lambda$ , percebe-se um estreitamento do lóbulo principal, ilustrado na figura 5.7. Com o aumento progressivo da frequência, o surgimento de lóbulos laterais é evidente.

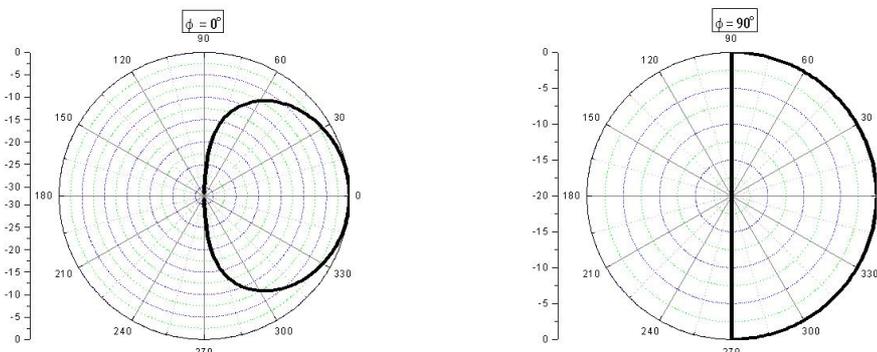


Figura 5.4 - Diagramas de radiação para frequência 0.8 GHz,  $L / \lambda = 0.32$ , nos planos  $\phi = 0^\circ$  e  $\phi = 90^\circ$ , respectivamente.

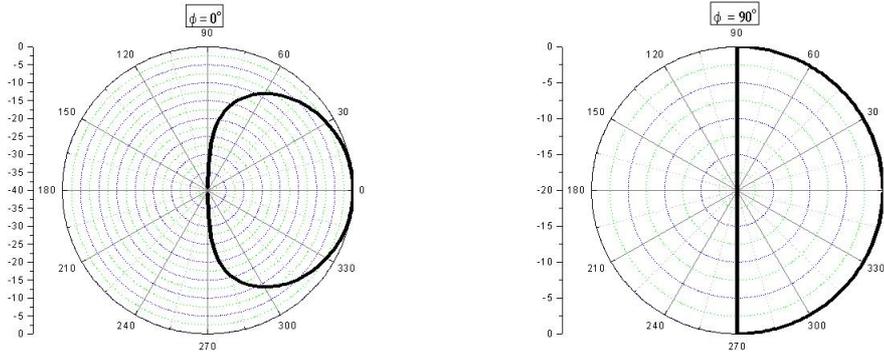


Figura 5.5 - Diagramas de radiação para frequência 1.0 GHz,  $L / \lambda = 0.40$ , nos planos  $\phi = 0^\circ$  e  $\phi = 90^\circ$ , respectivamente.

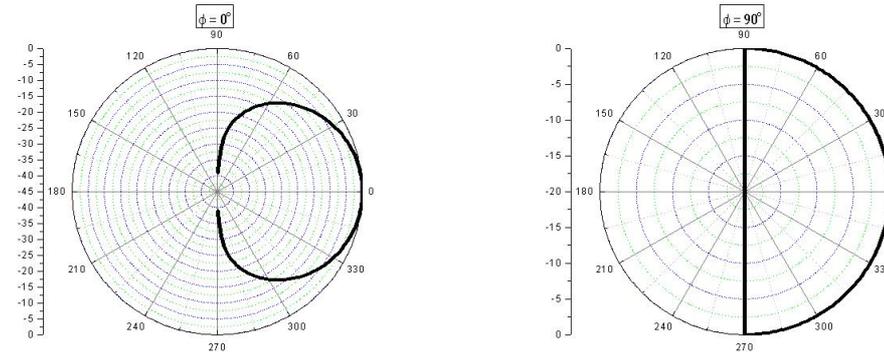


Figura 5.6 - Diagramas de radiação para frequência 1.5 GHz,  $L / \lambda = 0.60$ , nos planos  $\phi = 0^\circ$  e  $\phi = 90^\circ$ , respectivamente.

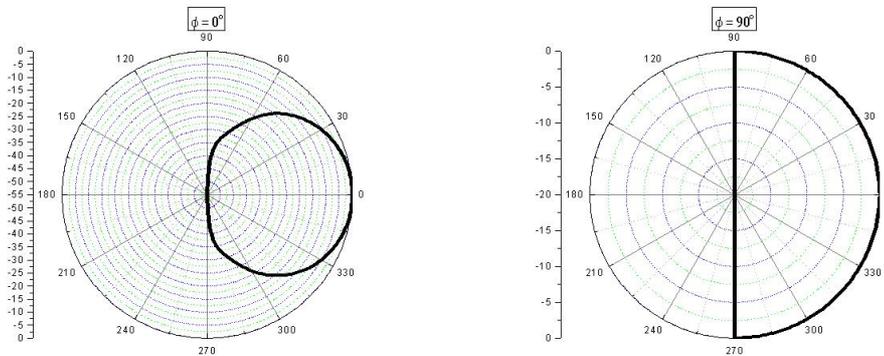


Figura 5.7 - Diagramas de radiação para frequência 2.0 GHz,  $L / \lambda = 0.80$ , nos planos  $\phi = 0^\circ$  e  $\phi = 90^\circ$ , respectivamente.

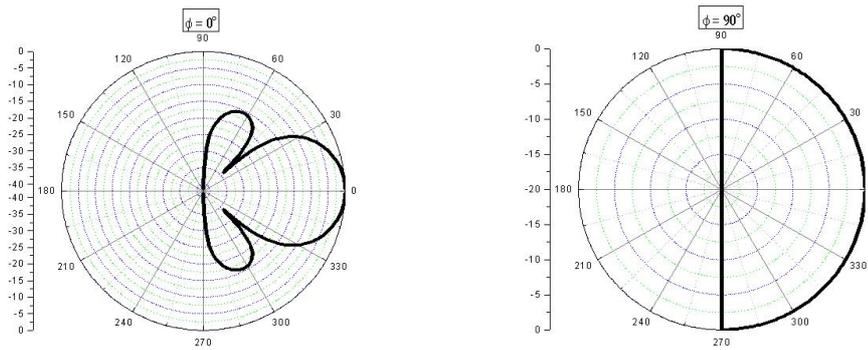


Figura 5.8 - Diagramas de radiação para frequência 2.5 GHz,  $L/\lambda = 1.00$ , nos planos  $\phi = 0^\circ$  e  $\phi = 90^\circ$ , respectivamente.

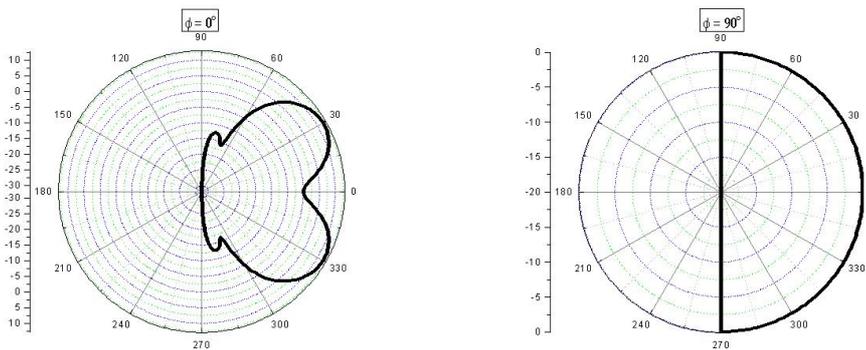


Figura 5.9 - Diagramas de radiação para frequência 4.5 GHz,  $L/\lambda = 1.80$ , nos planos  $\phi = 0^\circ$  e  $\phi = 90^\circ$ , respectivamente.

A tabela 5.3 apresenta as larguras de feixe aproximadas para os diagramas apresentados nas figuras 5.4 a 5.9:

Frequência [GHz]	$L/\lambda$	Largura de Feixe [Graus]
0.8	0.32	78
1.0	0.40	70
1.5	0.60	56
2.0	0.80	46
2.5	1.00	36
4.5	1.80	118

Tabela 5.2 - Larguras de feixe aproximadas para os diagramas apresentados nas figuras 5.4 a 5.9.

As figuras 5.10 a 5.15 ilustram o comportamento das correntes magnéticas.

Observa-se então a presença de uma onda estacionária. É importante notar a inversão de fase à medida que comprimento da fenda aproxima-se do comprimento de onda, como pode ser visualizado na figura 5.15.

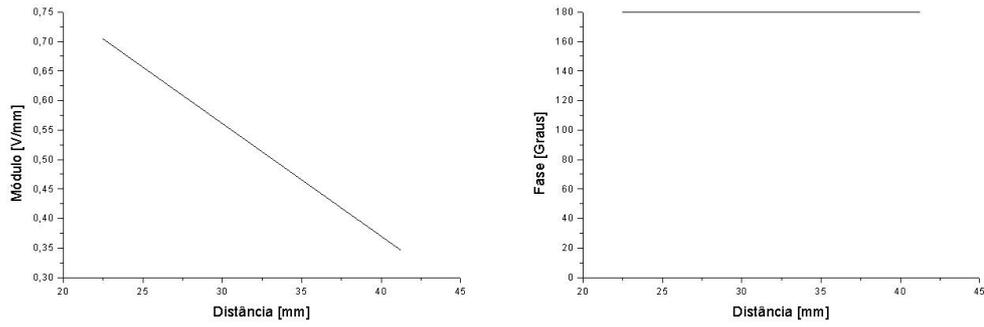


Figura 5.10 - Módulo e fase das correntes magnéticas para frequência 0.8 GHz,  $L/\lambda = 0.32$ .

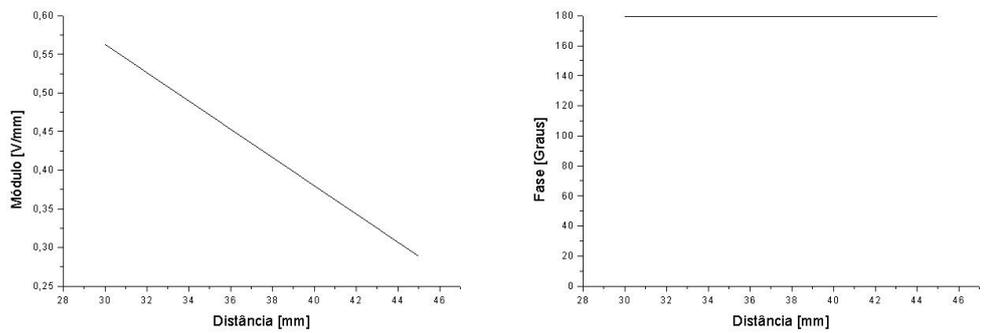


Figura 5.11 - Módulo e fase das correntes magnéticas para frequência 1.0 GHz,  $L/\lambda = 0.40$ .

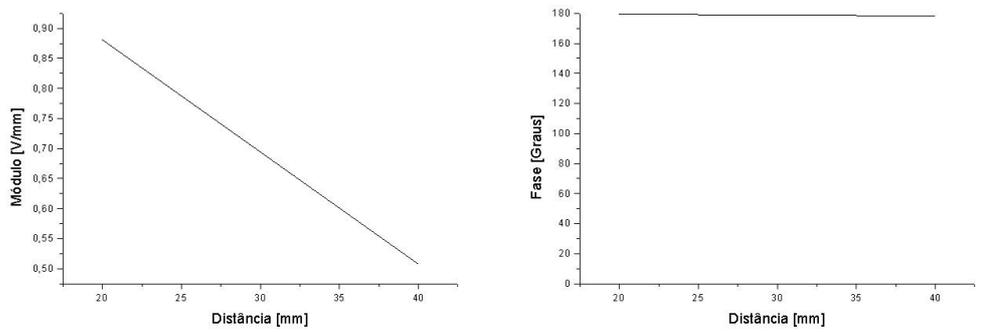


Figura 5.12 - Módulo e fase das correntes magnéticas para frequência 1.5 GHz,  $L/\lambda = 0.60$ .

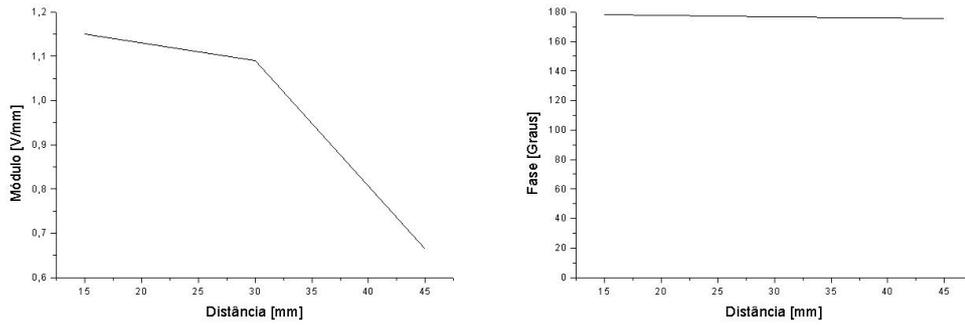


Figura 5.13 - Módulo e fase das correntes magnéticas para frequência 2.0 GHz,  $L/\lambda = 0.80$ .

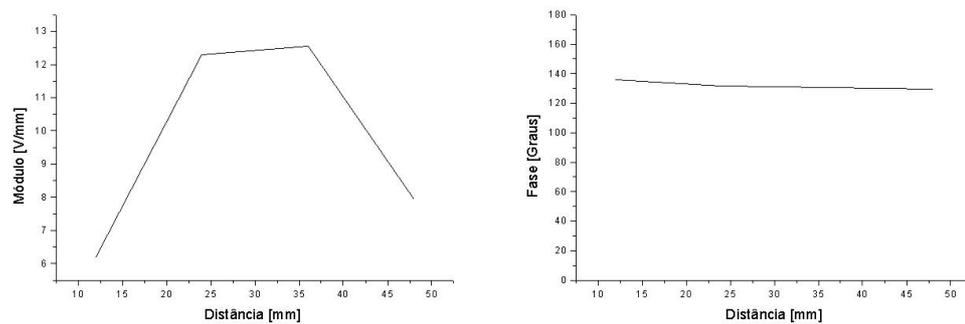


Figura 5.14 - Módulo e fase das correntes magnéticas para frequência 2.5 GHz,  $L/\lambda = 1.00$ .

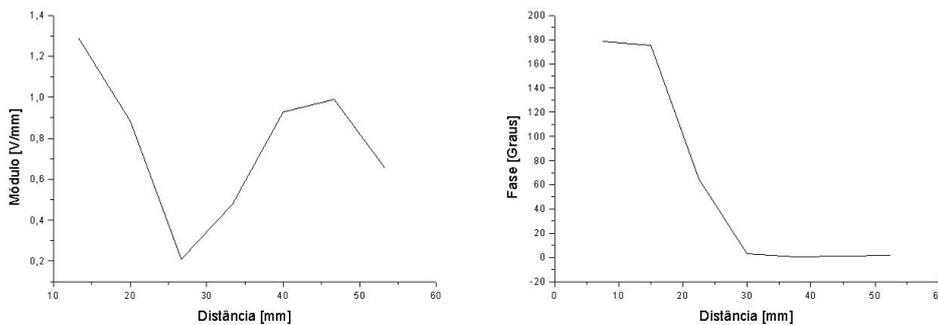


Figura 5.15 - Módulo e fase das correntes magnéticas para frequência 4.5 GHz,  $L/\lambda = 1.80$ .

Além disso, a simulação dos resultados para a relação axial comprovou uma polarização linear, como esperado para uma antena deste tipo.

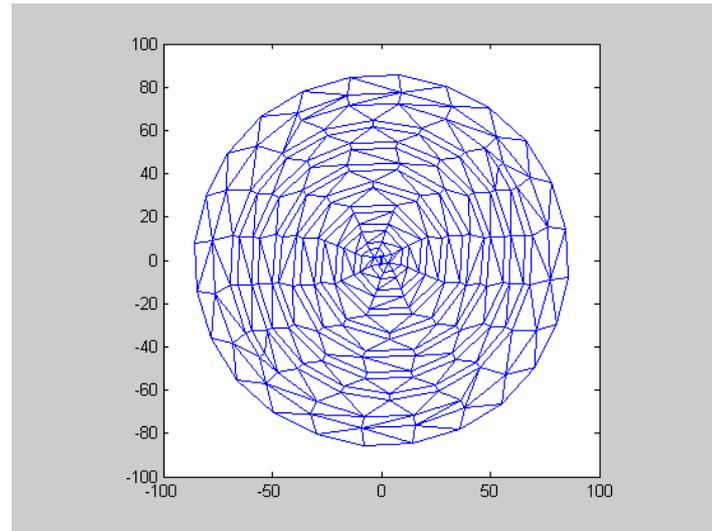
#### 5.4. Resultados para Antenas Espirais Tipo Fenda

O mesmo algoritmo agora foi empregado em uma antena espiral tipo fenda. A largura da fenda utilizada ( $w$ ) é 10 mm, a constante de expansão ( $a$ )

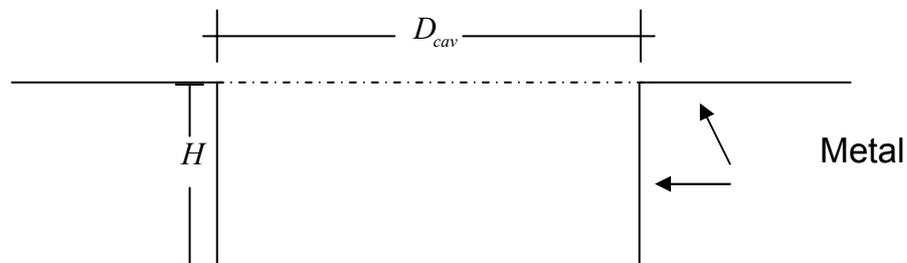
3mm/rad e o diâmetro da espiral ( $D_{\text{esp}}$ ) é 140 mm. A cavidade metálica circular na qual a antena se encontra possui 10,0 mm de altura ( $H$ ) e um diâmetro ( $D_{\text{cav}}$ ) 172,0 mm.

Para a construção da malha, procurou-se formar elementos que possuíssem arestas cujo comprimento fosse da ordem de 0.1 comprimentos de onda.

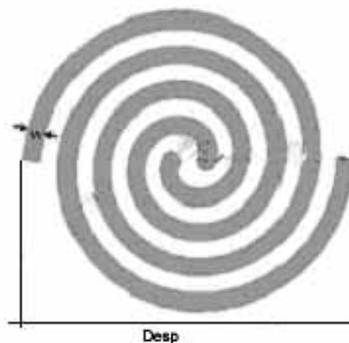
A malha bidimensional determinada pelo algoritmo para a frequência 2GHz pode ser visualizada pela figura 5.16:



(a)



(b)



(c)

Figura 5.16 - Vista superior (a) e vista lateral (b) da antena espiral tipo fenda discretizada por prismas e hexaedros, em 2.0 GHz (c) detalhe das dimensões da antena espiral.

Esta malha, que se estendeu ao longo da altura da cavidade, foi dividida, para esta freqüência, em 89 hexaedros e 264 prismas distribuídos em apenas uma camada.

Os resultados relativos à relação axial podem ser visualizados pela figura 5.17; os diagramas de radiação são encontrados nas figuras 5.18 a 5.22, enquanto que os módulos e fases das correntes magnéticas estão ilustrados nas figuras 5.23 a 5.27.

Sabe-se que antenas deste tipo, apoiadas em uma cavidade absorvente e terminadas com materiais resistivos, são capazes de atender a uma grande banda passante. No caso, a antena a ser analisada, encontra-se numa cavidade metálica, de maneira que o objetivo principal é verificar a largura de banda que a antena suporta.

Observa-se pela figura 5.17 que a relação axial é bastante razoável para a banda 2.5 GHz a 6 GHz.

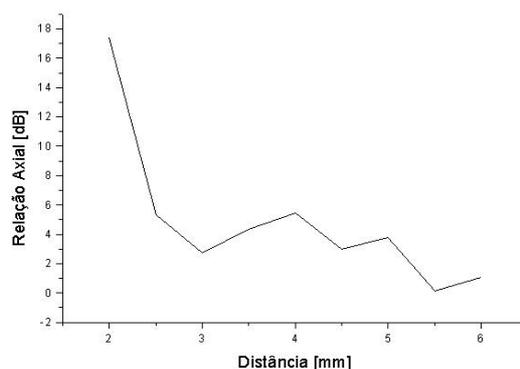


Figura 5.17 – Relação Axial x Freqüência.

A tabela 5.4 apresenta as larguras de feixe aproximadas para os diagramas apresentados nas figuras 5.18 a 5.22:

Freqüência [GHz]	Largura de Feixe Plano H [Graus]	Largura de Feixe Plano E [Graus]
2.5	52	62
3.0	38	112
4.0	40	72
5.0	72	38
6.0	78	120

Tabela 5.3 - Larguras de feixe aproximadas para os diagramas apresentados nas figuras 5.18 a 5.22.

Observa-se que, na faixa de 2.5 GHz a 6 GHz, os diagramas sofrem influência da freqüência, com uma variação da largura de feixe de cerca de 68% no plano E e cerca de 51% no plano H.

Além disso, verifica-se uma assimetria entre os plano E e H. Nota-se que nesta faixa estão as freqüências de ressonância de diversos modos da cavidade. Se a faixa for limitada a 3 GHz a 4 GHz, (faixa de 33% da freqüência central), os diagramas e a relação axial permanecem razoavelmente constantes.

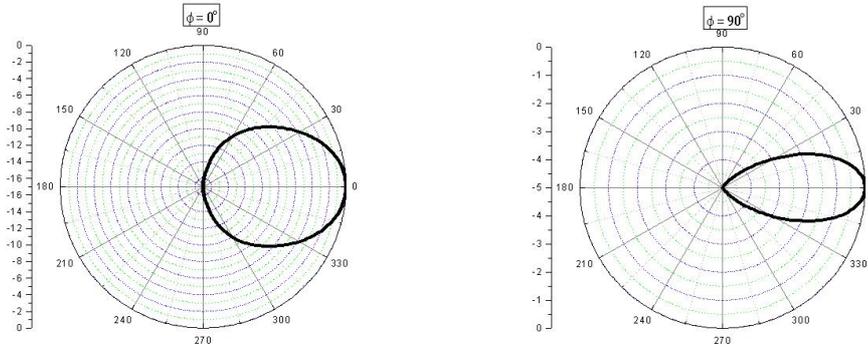


Figura 5.18 - Diagramas de radiação para freqüência 2.5 GHz nos planos H e E, respectivamente.

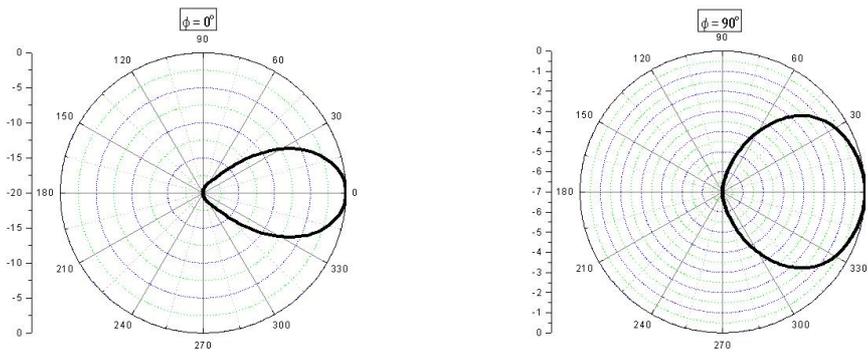


Figura 5.19 - Diagramas de radiação para freqüência 3.0 GHz nos planos H e E, respectivamente.

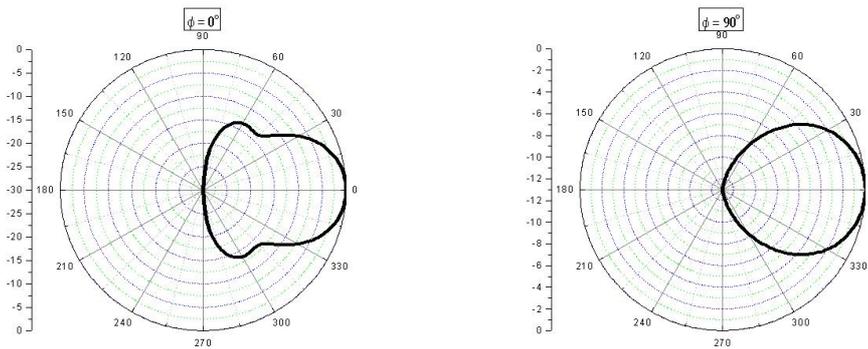


Figura 5.20 - Diagramas de radiação para freqüência 4.0 GHz nos planos H e E, respectivamente.

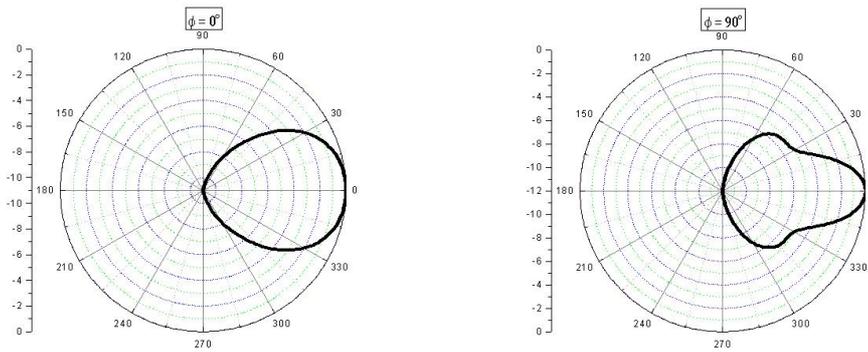


Figura 5.21 - Diagramas de radiação para frequência 5.0 GHz nos planos H e E, respectivamente.

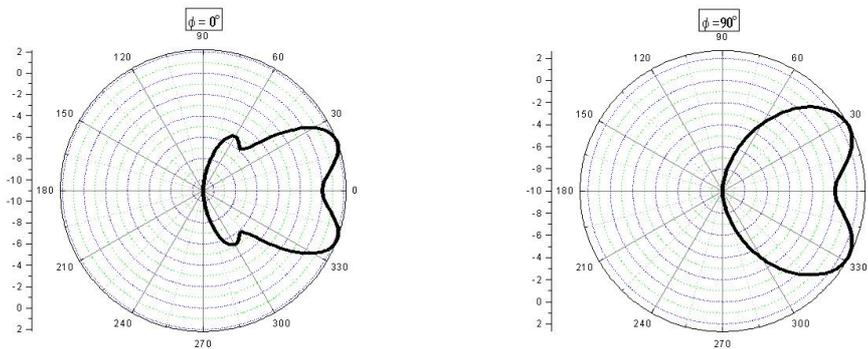


Figura 5.22 - Diagramas de radiação para frequência 6.0 GHz nos planos H e E, respectivamente.

Analisando as curvas correspondentes às correntes magnéticas, pode-se observar que para as primeiras frequências, a existência de uma onda estacionária é evidente, devido basicamente às reflexões que ocorrem junto à borda. Isto fica claro, com a presença marcante dos máximos e mínimos nas ilustrações referentes ao módulo das correntes.

Quando a frequência aumenta, esta influência das reflexões nas bordas diminui, e pode-se visualizar uma onda progressiva, como esperado.

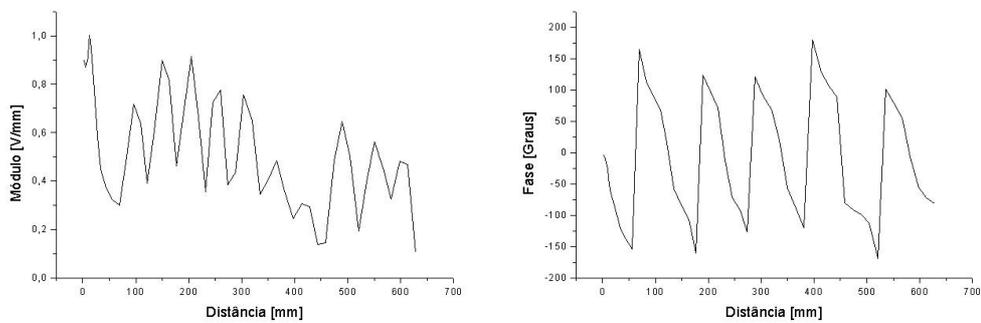


Figura 5.23 - Módulo e fase das correntes magnéticas para frequência 2.5 GHz.

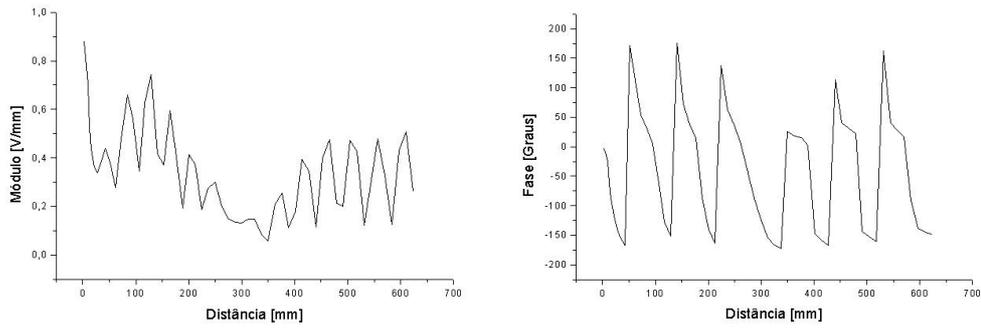


Figura 5.24 - Módulo e fase das correntes magnéticas para frequência 3.0 GHz.

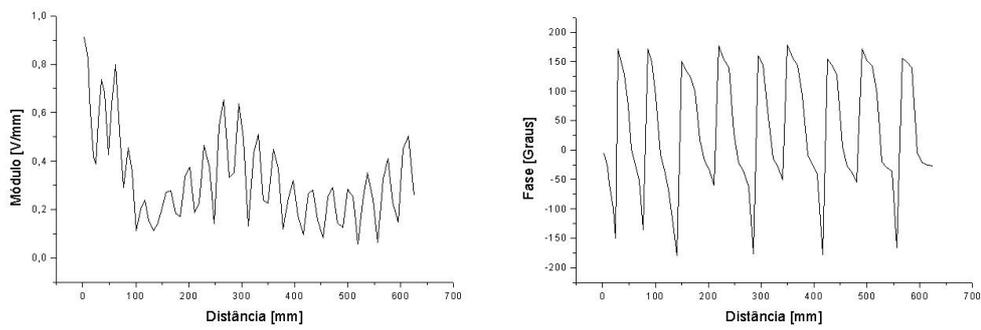


Figura 5.25 - Módulo e fase das correntes magnéticas para frequência 4.0 GHz.

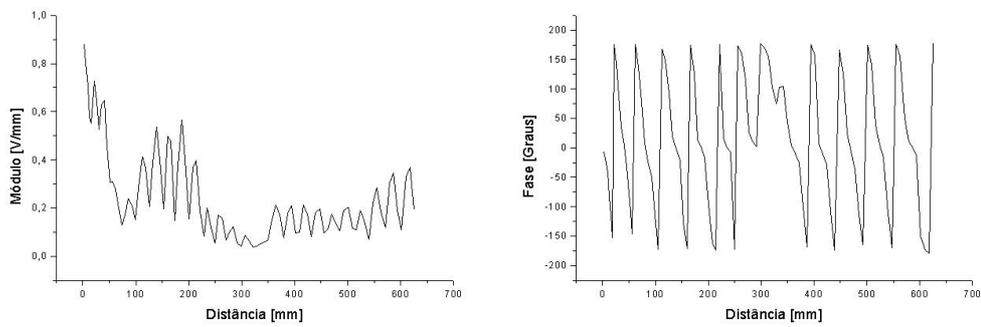


Figura 5.26 - Módulo e fase das correntes magnéticas para frequência 5.0 GHz.

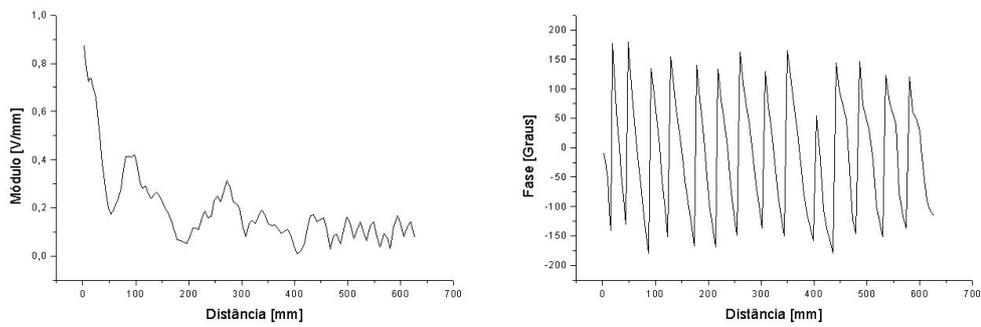


Figura 5.27 - Módulo e fase das correntes magnéticas para frequência 6.0 GHz.

Em resumo, os resultados mostram que a antena em análise, montada em cavidade metálica, sofre os efeitos negativos da cavidade, que torna seu desempenho variável com a frequência.

Apesar disso, os diagramas e a relação axial apresentam valores razoáveis dentro de uma faixa de frequências de pelo menos 3 a 5 GHz, o que torna a antena uma opção para aplicações que não exijam faixas extremamente altas, ou especificações rígidas.