

## 4 Análise do Comportamento dos Campos Transversais na Estrutura Guiada em Estudo

### 4.1. Introdução

Neste capítulo é realizada uma análise do comportamento dos campos transversais da estrutura guiada composta por um guia cilíndrico corrugado com bastão dielétrico anisotrópico. É realizada também uma comparação com outras estruturas já existentes na literatura, entre elas, guia cilíndrico oco, guia cilíndrico corrugado, guia cilíndrico com bastão dielétrico isotrópico e guia cilíndrico corrugado com bastão dielétrico isotrópico. Foram feitas avaliações visuais para verificar o comportamento da distribuição dos campos transversais dos modos híbridos no guia e, verificar qual modo fornece a menor taxa de reflexão quando da transição com o guia oco operando com o modo principal TE<sub>11</sub>.

Inicialmente foi estudado o guia cilíndrico oco, onde foi observado o comportamento do modo TE<sub>11</sub>.

### 4.2. Estruturas Conhecidas

#### 4.2.1. Guia Cilíndrico Oco (modo principal TE<sub>11</sub>)

Para avaliação da formulação, foi considerado o caso do guia cilíndrico oco apresentado em [10] onde o raio do guia ( $a$ ) é de 63,17mm, as equações para o campo elétrico na abertura de um guia cilíndrico oco em coordenadas cilíndricas são dadas por:

$$\begin{aligned} E_a &= \hat{a}_\rho E_\rho + \hat{a}_\phi E_\phi \\ E_\rho &= E_0 J_1(x'_{11} \rho' / a) \sin \phi' / \rho' \\ E_\phi &= E_0 J'_1(x'_{11} \rho' / a) \cos \phi' \end{aligned}$$

ou, em coordenadas retangulares:

$$E_a = \hat{a}_x E_x + \hat{a}_y E_y$$

$$E_x = E_0 J_1(x'_{11} \rho' / a) \sin \phi' \cos \phi' / \rho' - E_0 J'_1(x'_{11} \rho' / a) \sin \phi' \cos \phi'$$

$$E_y = E_0 J_1(x'_{11} \rho' / a) \sin^2 \phi' / \rho' + E_0 J'_1(x'_{11} \rho' / a) \cos^2 \phi'$$

onde  $a$  é o raio do dielétrico,  $x'_{11}=1,841$  é a primeira raiz da derivada da função de Bessel de primeira ordem e  $\rho'$  é a variação do raio.

A Figura 4.1 ilustra a distribuição de campo vetorial na abertura circular do modo TE<sub>11</sub>, onde pode ser verificado que a distribuição do campo para o guia cilíndrico oco é uma distribuição quase constante e uniforme no guia. Isto gera boa característica de polarização direta com baixa polarização cruzada.

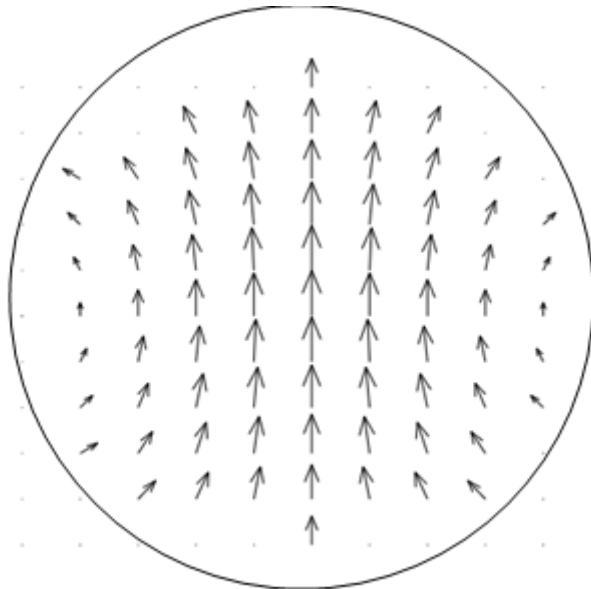


Figura 4.1 - Campo Vetorial na abertura circular do modo TE<sub>11</sub> no plano terra, para guia cilíndrico oco,  $a = r_0 = 63,17$  mm.

#### 4.2.2. Guia Cilíndrico Corrugado (modos Híbridos)

Para o estudo do guia cilíndrico corrugado foi adotada a geometria apresentada em [6] onde o raio interno do guia ( $r_0$ ) é de 63,17 mm, o raio externo  $r_2$  é dado por  $r_0 + d$ , com a profundidade de corrugação  $d = 14$  mm, conforme pode ser visualizado na Figura 4.2.

Este estudo permite verificar o comportamento dos modos EH<sub>11</sub> e HE<sub>11</sub> na abertura circular do guia corrugado. A frequência de trabalho que dá a melhor polarização cruzada é a do caso em que a profundidade de corrugação é próxima a  $\lambda/4$ , profundidade que permite obter o balanceamento híbrido [5].

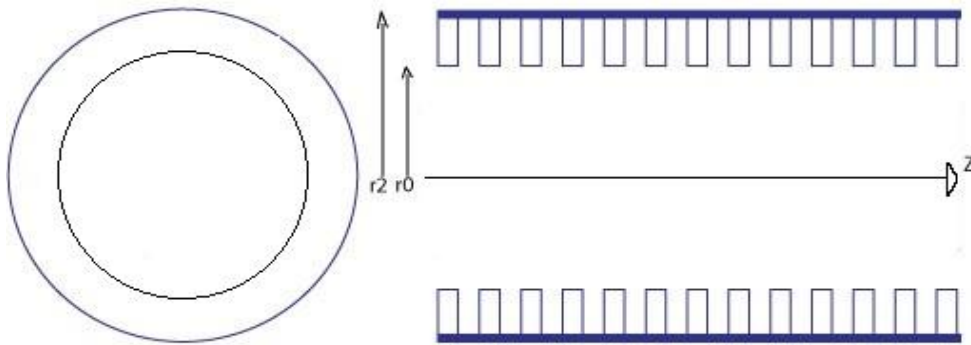


Figura 4.2 - Guia cilíndrico corrugado com raio interno  $r_0 = 63,17$  mm e profundidade de corrugação  $d = 14$  mm, com  $r_2 = r_0 + d$ .

#### 4.2.2.1. Modo EH11

A Figura 4.3 apresenta o gráfico do campo elétrico vetorial na abertura do guia cilíndrico corrugado que corresponde ao modo EH11 para a frequência  $f = 2,3$  GHz,  $k_0 = 48,05$ , e  $\beta/k_0 = 0,941$ , onde pode ser visto que a amplitude da intensidade de campo elétrico próximo às corrugações não muda com relação à amplitude deste campo no centro do guia. Próximo às corrugações é onde o campo se distorce e, portanto é indesejável que o campo tenha grande intensidade nesta região do guia.

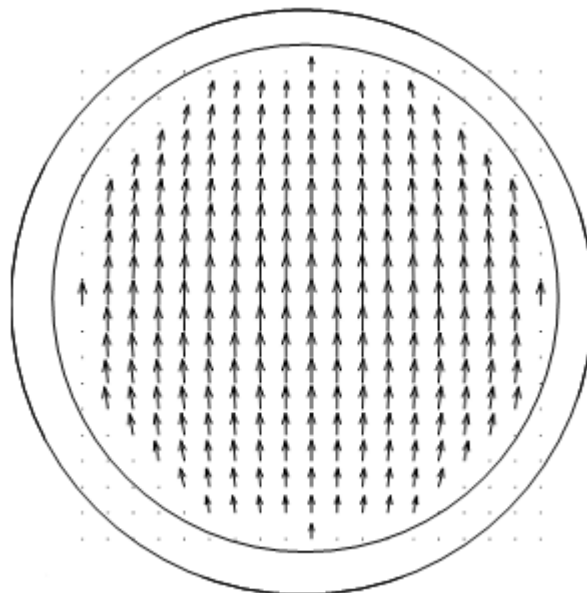


Figura 4.3 - Campo Vetorial na abertura circular do guia corrugado do modo EH11, com  $r_0 = 63,17$  mm,  $d = 14$  mm,  $r_2 = 77,17$  mm,  $k_0 = 48,05$ ,  $\beta/k_0 = 0,941$ .

#### 4.2.2.2. Modo HE11

A Figura 4.4 mostra a distribuição de campo vetorial na seção transversal utilizando os mesmos valores de profundidade de corrugação  $d = 14$  mm e raio  $r_0 = 63,17$  mm, para a frequência  $f = 5,36$  GHz,  $k_0 = 112,28$ ,  $\beta/k_0 = 0,941$ . Conforme mencionado em [5], nesta frequência os campos radiados apresentam a menor polarização cruzada [5]. Comparando a distribuição de campo vetorial na abertura do guia circular corrugado do modo HE11 com o gráfico do campo vetorial na abertura do guia circular oco do modo TE11, verifica-se que os campos vetoriais para os dois modos são bastante parecidos no centro, mas, diferentemente do modo TE11, a intensidade do campo elétrico nas bordas das corrugações no topo e na base decai acentuadamente, tendendo a zero para a condição de balanceamento híbrido. O que não ocorre no modo EH11, onde a intensidade do campo permanece alta conforme pode ser visto na Figura 4.3.

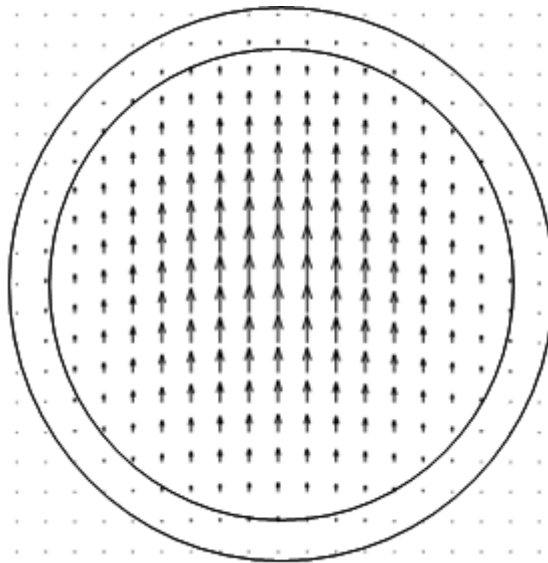


Figura 4.4 - Campo Vetorial na abertura circular do guia corrugado para o modo HE11, parâmetros  $r_0 = 63,17$  mm,  $d = 14$  mm,  $r_2 = 77,17$  mm  $k_0 = 112,28$ ,  $\beta/k_0 = 0,941$ .

#### 4.2.3. Guia Cilíndrico Metálico Liso com Bastão Dielétrico (modos Híbridos)

Usando as equações obtidas para o guia cilíndrico metálico liso com dielétrico isotrópico, simulam-se condições para o caso em que o dielétrico possui permissividade igual a 1,15. O raio utilizado foi o mesmo que o do caso

do guia corrugado,  $r_0 = 63,17$  mm. Neste caso, não existe corrugação e o raio do dielétrico é dado por  $r_1 = 0,8r_0$ .

#### 4.2.3.1. Modo EH11

A Figura 4.5 mostra a distribuição de campo do modo EH11 para um guia cilíndrico metálico liso com dielétrico isotrópico de permissividade  $\epsilon_r = 1,15$ , raio  $r_0 = 63,17$  mm,  $r_1 = 50,54$  mm, e frequência  $f = 9,55$  GHz, onde  $k_0 = 200$  e  $\beta/k_0 = 1,4$ .

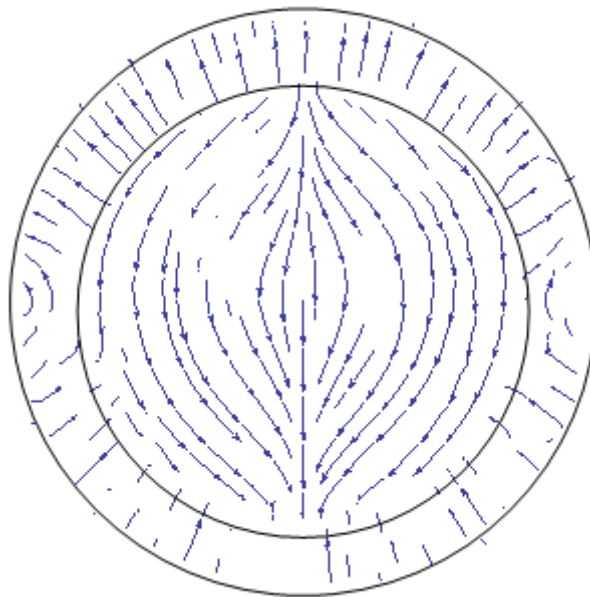


Figura 4.5 - Campo Vetorial na abertura circular do guia cilíndrico metálico com dielétrico de  $\epsilon_r = 1,15$ , do modo EH11,  $r_0 = 63,17$  mm,  $r_1 = 50,54$  mm,  $k_0 = 200$ ,  $\beta/k_0 = 1,4$ .

Verifica-se da Figura 4.5 que o campo apresentou mudanças de direção ao longo da abertura transversal do guia. Na região entre as bordas do guia e o bastão dielétrico, a amplitude da intensidade de campo não variou significativamente com relação à amplitude na região dielétrica. Houve grande distorção na distribuição de campo na interface dielétrico-ar. A distribuição dentro do guia foi afetada, não estando mais uniforme. Cabe complementar que, em especial neste caso para o modo EH11, a distribuição do campo sofre grande influência da interação entre a permissividade do bastão dielétrico e a interface compreendida pela região entre o dielétrico e as bordas do guia.

#### 4.2.3.2. Modo HE11

A Figura 4.6 mostra a distribuição de campo ao longo da seção transversal de um guia metálico com bastão dielétrico, como raio  $r_0 = 63,17$  mm,  $r_1 = 50,54$  mm,  $\epsilon_r = 1,15$ , frequência 9,55 GHz, onde  $k_0 = 200$  e  $\beta/k_0 = 0,9756$ . Observa-se que a distribuição do campo elétrico foi distorcida apresentando uma distribuição próxima ao do campo de um guia cilíndrico oco para o modo TE11, porém com distribuição mais uniforme e constante.

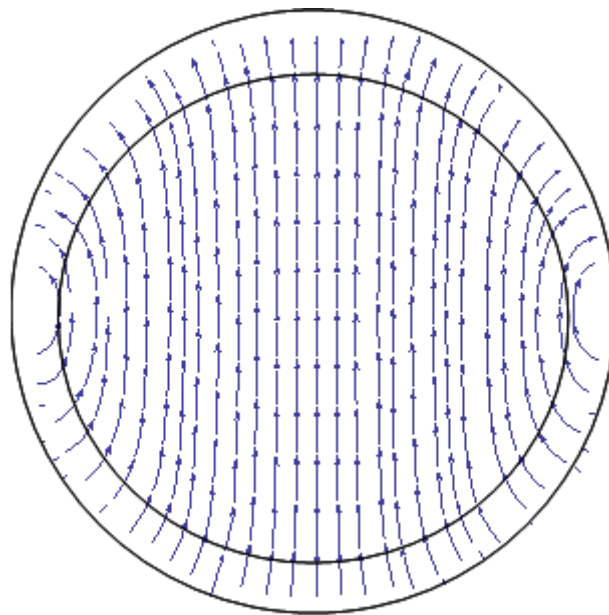


Figura 4.6 - Campo Vetorial na abertura circular para o guia cilíndrico metálico com dielétrico de  $\epsilon_r = 1,15$  do modo HE11, raio  $r_0 = 63,17$  mm,  $r_1 = 50,54$  mm,  $k_0 = 200$ ,  $\beta/k_0 = 0,9756$ .

#### 4.2.4. Guia Cilíndrico Corrugado com Bastão Dielétrico Isotrópico (modos Híbridos)

Depois de ter obtido os campos na abertura para os casos de guia cilíndrico oco, de guia cilíndrico corrugado e de guia cilíndrico metálico com bastão dielétrico, obtém-se os campos para o caso de guia cilíndrico corrugado com bastão dielétrico. Utilizando a equação característica obtida no Capítulo 3 e os parâmetros da estrutura definida no Capítulo 2, foram obtidas as curvas características para a estrutura simulada com permissividade igual a 1,15.

Para o guia cilíndrico corrugado com bastão dielétrico, os raios  $r_0$  (raio interno do guia cilíndrico),  $r_1$  (raio do bastão dielétrico) e  $r_2$  (raio externo do guia cilíndrico) da estrutura utilizada foram:  $r_0 = 63,17$  mm,  $r_1 = 50,54$  mm e  $r_2 = r_0 + d = 77,17$  mm, onde  $d$  é a profundidade de corrugação e igual a 14 mm. Com as curvas características para o caso em que  $\epsilon_t = \epsilon_z = 1,15$ , verificou-se que o modo EH11 possui uma faixa de operação muito pequena em relação à faixa de operação do modo HE11. Verificou-se também que, a frequência de corte para os modos EH não mudam com a inclusão da corrugação, mas para os modos HE, esta diminui, inclusive para o modo HE11. Escolhendo um valor aleatório para  $k_0$ , foram obtidos gráficos do campo elétrico vetorial na abertura para os modos EH11 e HE11.

#### 4.2.4.1. Modo EH11

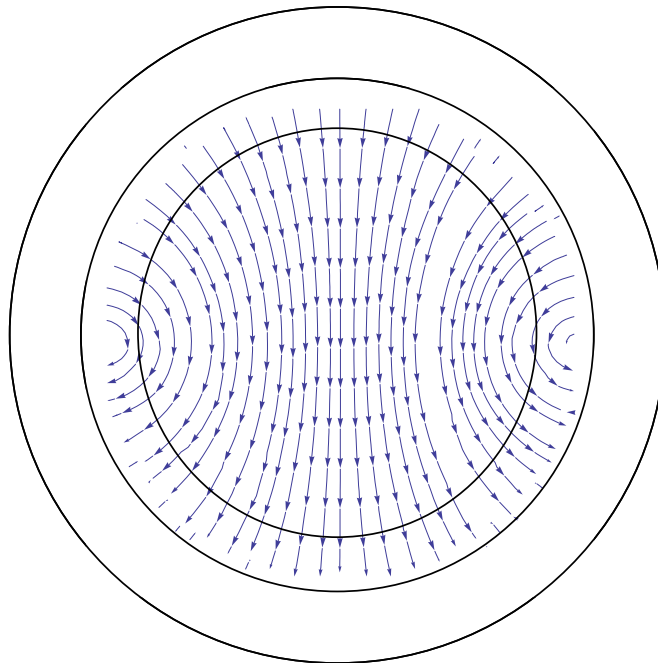


Figura 4.7 - Campo Elétrico na Abertura do guia cilíndrico corrugado com bastão dielétrico, EH11,  $\epsilon_z = \epsilon_t = 1,15$ ,  $r_0 = 63,17$  mm,  $r_1 = 50,54$  mm,  $r_2 = 77,17$  mm,  $k_0 = 51,25$ ,  $\beta/k_0 = 1,0544$ .

Escolhendo  $k_0 = 51,25$ , obtém-se  $\beta/k_0 = 1,0544$ . Com estes valores, foi construído o gráfico vetorial para o campo elétrico na abertura do guia cilíndrico corrugado com bastão dielétrico do modo EH11, visualizado na Figura 4.7, onde pode ser verificado que, para o guia cilíndrico corrugado com bastão dielétrico

isotrópico de permissividade igual a 1,15 e dimensões dadas pela estrutura em estudo ( $r_0 = 63,17$  mm,  $r_1 = 50,54$  mm e  $r_2 = 77,17$  mm), o campo na abertura apresenta distorções dentro do dielétrico e próximo à interface entre o dielétrico e as corrugações.

#### 4.2.4.2. Modo HE11

Escolhendo  $k_0 = 200$ , obtém-se  $\beta/k_0 = 1,0544$ . Com estes valores, foi construído o gráfico vetorial para o campo elétrico na abertura do guia cilíndrico corrugado com bastão dielétrico do modo HE11, visualizado na Figura 4.8, sendo observada uma distribuição bastante uniforme, onde é esperada uma boa qualidade de polarização direta (baixo nível de polarização cruzada e alto ganho de radiação). Espera-se, pela distribuição ser próxima da do modo TE11, que uma transição com o guia cilíndrico oco operando neste modo produzirá baixa perda de retorno (reflexão).

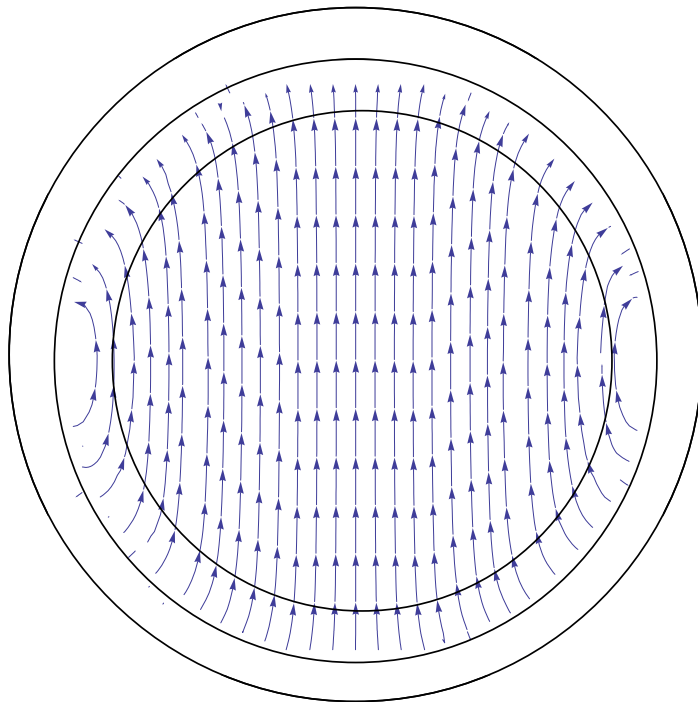


Figura 4.8 - Campo Elétrico na Abertura do guia cilíndrico corrugado com bastão dielétrico isotrópico, modo HE11,  $\epsilon_z = \epsilon_t = 1,15$ ,  $r_0 = 63,17$  mm,  $r_1=50,54$  mm,  $r_2=77,17$  mm,  $k_0 = 200$ ,  $\beta/k_0 = 1,0544$ .



### 4.3. Estrutura em estudo: Guia Cilíndrico Corrugado com Bastão Dielétrico Anisotrópico

Após a obtenção dos campos vetoriais das estruturas de guias cilíndricos conhecidos na literatura, passa-se à obtenção dos campos vetoriais para a estrutura em estudo, ou seja, para o guia cilíndrico corrugado com bastão dielétrico anisotrópico. A partir da equação característica obtida no Capítulo 2, são geradas as curvas características para os modos híbridos HE<sub>11</sub> do caso em estudo, utilizando uma permissividade de  $\epsilon_t = 1,5$  e  $\epsilon_z = 1,1$  (valores escolhidos aleatoriamente). Optou-se por um material com permissividade relativa igual a 1,5 e introduziu-se a anisotropia, usando então os valores de  $\epsilon_z = 1,5$  e  $\epsilon_t = 1,1$ . Para todos os casos em estudo, o raio  $r_0$  usado é 63,17 mm,  $r_1 = 50,54$  mm e  $r_2 = 77,17$  mm, com a profundidade de corrugação  $d = 14$  mm.

#### 4.3.1. Efeito da Anisotropia no Bastão Dielétrico nos Campos Transversais

Escolheu-se o caso em que a permissividade é isotrópica e igual a 1,5. Em seguida, adicionou-se a anisotropia de duas formas, primeiro mantendo  $\epsilon_z = 1,5$  e fazendo  $\epsilon_t = 1,1$ , depois, escolhendo  $\epsilon_z = 1,1$  e  $\epsilon_t = 1,5$ . Deste modo buscou-se verificar o efeito da anisotropia sobre o campo na abertura do guia para o modo HE<sub>11</sub>. O modo EH<sub>11</sub> não foi analisado aqui, pois a faixa de frequências escolhida estava acima de sua frequência de corte superior. Escolheu-se a faixa de frequência de  $k_0 = 65$  a  $k_0 = 150$ .

##### 4.3.1.1. Dielétrico Isotrópico, $\epsilon_r = \epsilon_z = \epsilon_t = 1,5$

Neste caso,  $\epsilon_z = 1,5$  e  $\epsilon_t = 1,5$ , caso isotrópico,  $\beta/k_0$  aumenta, conforme aumenta a frequência. Conforme  $\beta/k_0$  aumenta, o comportamento do campo melhora até atingir o ponto de balanceamento ( $\beta/k_0 = 1,225 = \text{raiz de } \epsilon_z$ ), depois, o comportamento do campo começa a piorar novamente, conforme pode ser visualizado nas Figuras 4.9.a, 4.9.b, 4.9.c e 4.9.d. As Figuras 4.9.a-d apresentam o campo elétrico na abertura para o modo HE<sub>11</sub> de um guia cilíndrico corrugado com dielétrico isotrópico de permissividade relativa igual a 1,5 e diferentes valores de  $k_0$ : a)  $k_0 = 65$ ,  $\beta/k_0 = 1,0177$ ; b)  $k_0 = 85$ ,  $\beta/k_0 = 1,1233$ ; c)  $k_0 = 105$ ,  $\beta/k_0 = 1,1607$ ; d)  $k_0 = 150$ ,  $\beta/k_0 = 1,1927$ .

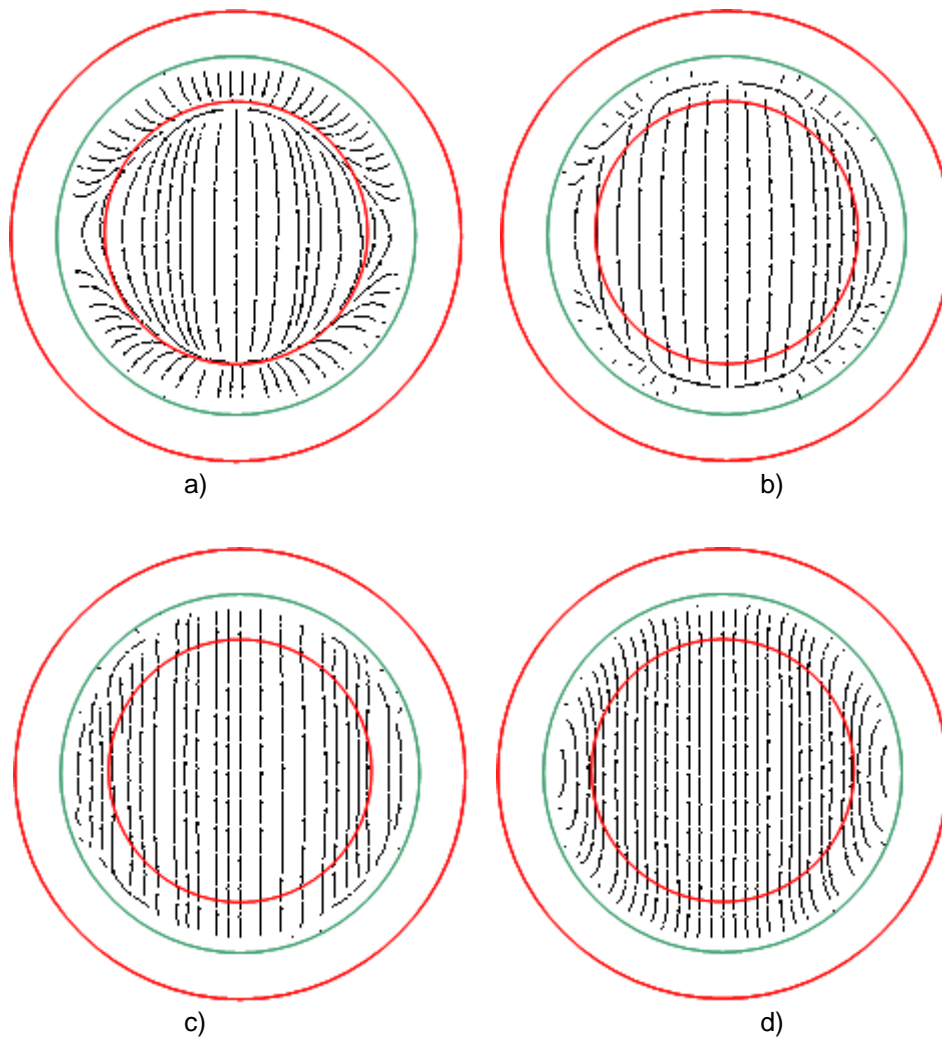


Figura 4.9 - Campo elétrico para modo HE<sub>11</sub> de um guia cilíndrico corrugado com dielétrico isotrópico com permissividade relativa igual a 1,5. a)  $k_0 = 65$ ,  $\beta/k_0 = 1,0177$ ; b)  $k_0 = 85$ ,  $\beta/k_0 = 1,1233$ ; c)  $k_0 = 105$ ,  $\beta/k_0 = 1,1607$ ; d)  $k_0 = 150$ ,  $\beta/k_0 = 1,1927$ .

Verificou-se que enquanto  $\beta/k_0$  é menor do que a raiz da permissividade do dielétrico, a distribuição do campo na abertura fica quase constante para uma faixa maior de frequência.

#### 4.3.1.2. Dielétrico Anisotrópico, $\epsilon_z = 1,5$ , $\epsilon_t = 1,1$

Neste caso, pode ser visualizado nas Figuras 4.10.a, 4.10.b, 4.10.c e 4.10.d, o campo elétrico na abertura para o modo HE<sub>11</sub> de um guia cilíndrico corrugado com dielétrico anisotrópico de permissividade na direção de propagação igual a 1,5, na direção transversal igual a 1,1 ( $\epsilon_z = 1,5$  e  $\epsilon_t = 1,1$ ) e

diferentes valores de  $k_0$ : a)  $k_0 = 65$ ,  $\beta/k_0 = 1,013$ ; b)  $k_0 = 85$ ,  $\beta/k_0 = 1,1273$ ; c)  $k_0 = 105$ ,  $\beta/k_0 = 1,1636$  e d)  $k_0 = 150$ ,  $\beta/k_0 = 1,1940$ . Verifica-se que  $\beta/k_0$  aumenta conforme aumenta a frequência. Conforme  $\beta/k_0$  aumenta, a distribuição do campo elétrico melhora até atingir o ponto de balanceamento ( $\beta/k_0 = 1,225 = \text{raiz de } \epsilon_z$ ).

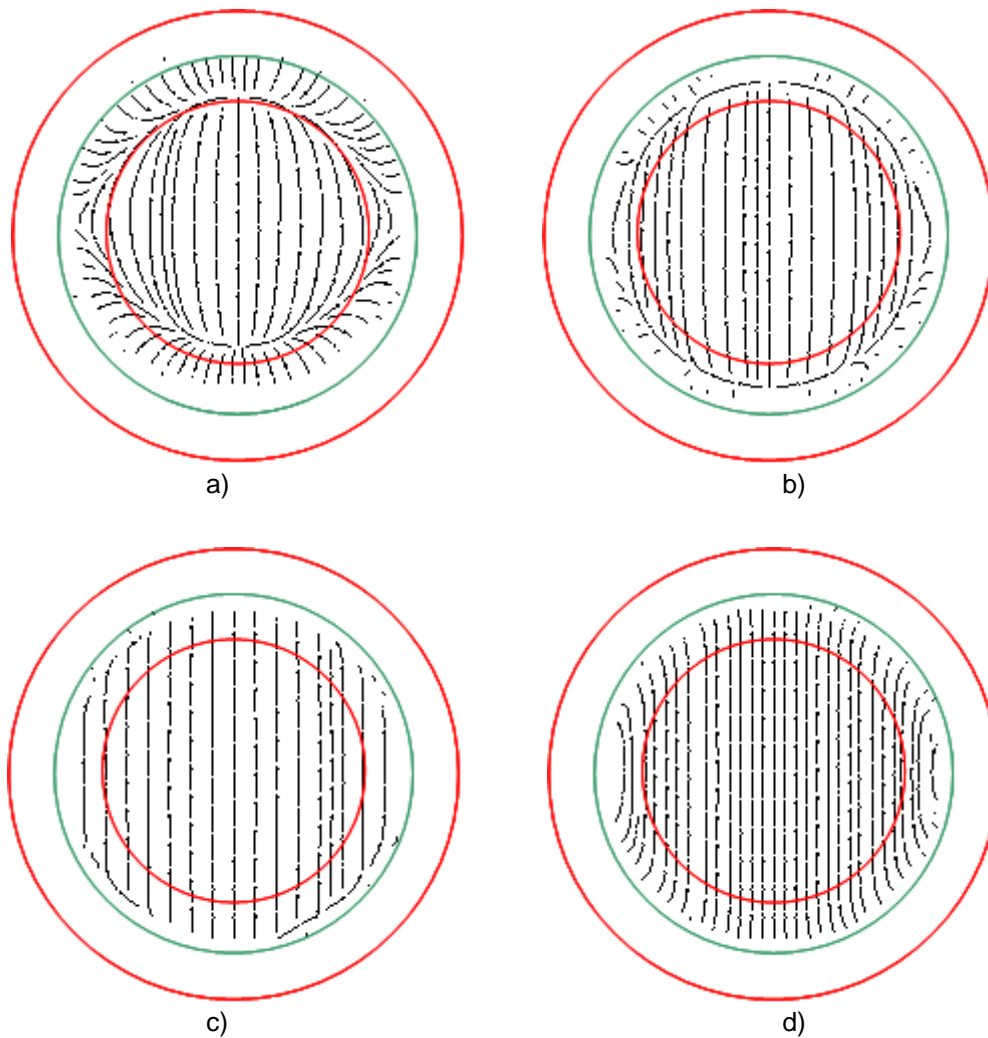


Figura 4.10 - Campo elétrico para modo HE<sub>11</sub> de um guia cilíndrico corrugado com dielétrico anisotrópico com permissividade  $\epsilon_z = 1,5$ ,  $\epsilon_t = 1,1$ . a)  $k_0 = 65$ ,  $\beta/k_0 = 1,013$ ; b)  $k_0 = 85$ ,  $\beta/k_0 = 1,1273$ ; c)  $k_0 = 105$ ,  $\beta/k_0 = 1,1636$ ; d)  $k_0 = 150$ ,  $\beta/k_0 = 1,1940$ .

#### 4.3.1.3. Dielétrico Anisotrópico, $\epsilon_z = 1,1$ , $\epsilon_t = 1,5$

Neste caso,  $\epsilon_z = 1,1$  e  $\epsilon_t = 1,5$ , a distribuição do campo melhora até  $\beta/k_0$  atingir raiz de  $\epsilon_z$ , como pode ser visualizado nas Figuras 4.11.

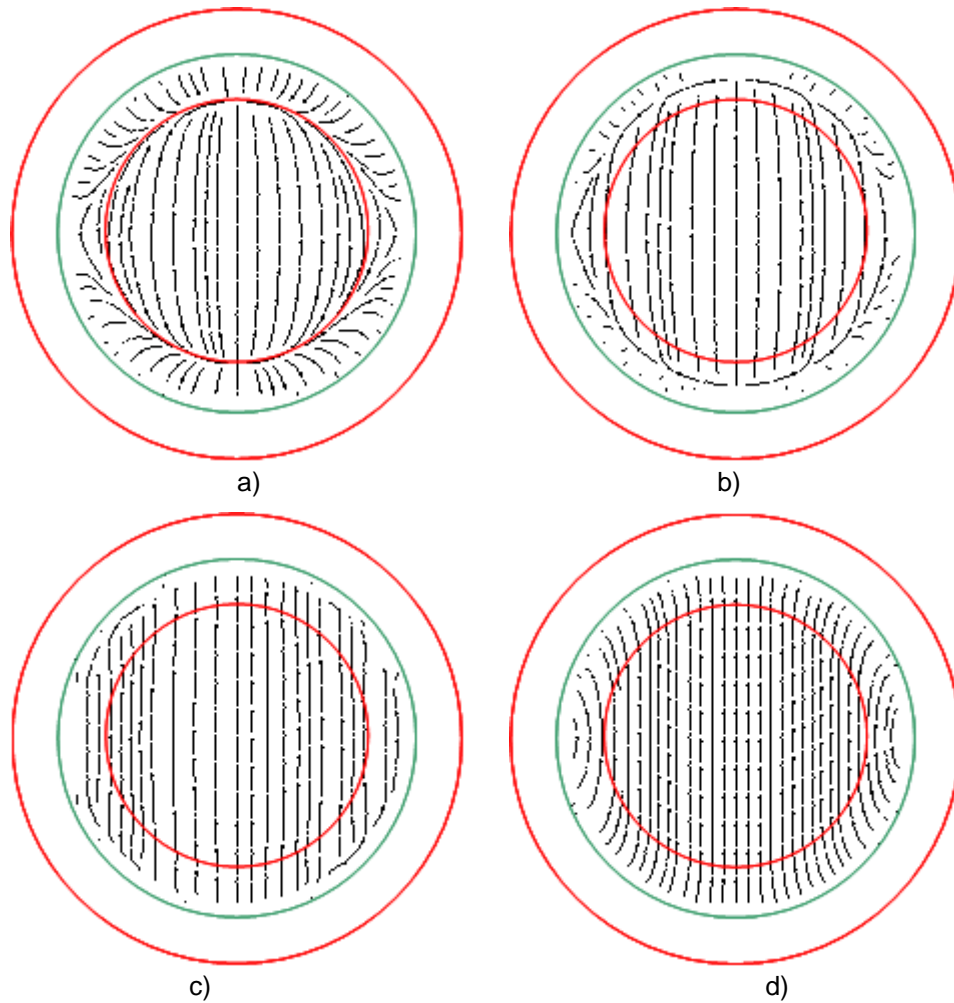


Figura 4.11 - Campo elétrico para modo HE<sub>11</sub> de um guia cilíndrico corrugado com dielétrico anisotrópico com  $\epsilon_z = 1,1$  e  $\epsilon_t = 1,5$ . a)  $k_0 = 65$ ,  $\beta/k_0 = 0,81092$ ; b)  $k_0 = 85$ ,  $\beta/k_0 = 0,9322$ ; c)  $k_0 = 105$ ,  $\beta/k_0 = 0,97726$ ; d)  $k_0 = 150$ ,  $\beta/k_0 = 1,0152$ .

Casos onde os valores de  $\beta/k_0$  ainda são menores do que a raiz de  $\epsilon_z$ , mas são maiores do que 1, quanto mais próximo de raiz de  $\epsilon_z$ , melhores ficam as distribuições dos campos.

Verifica-se das Figuras 4.9, 4.10 e 4.11 que quando  $\epsilon_z$  diminui, para o mesmo valor de  $k_0$ , os valores de  $\beta/k_0$  diminuem, ou seja, a curva característica fica mais abaixo do que as curvas características do caso com isotropia com  $\epsilon_r = 1,5$  e do caso com anisotropia com  $\epsilon_z = 1,5$  e  $\epsilon_t = 1,1$ .

#### 4.4. Discussão e Conclusões

Dos estudos realizados, verifica-se que o modo que mais se aproxima do modo TE<sub>11</sub> do caso de guia cilíndrico oco, é o modo HE<sub>11</sub>, para todos os casos estudados.

Pode-se verificar pelas Figuras 4.9 a 4.11 que o campo apresenta distorções na região entre  $r_1$  e  $r_0$  (mais próximo a  $r_1$ ) para as freqüências mais baixas, onde o número de onda normalizado com relação a  $k_0$  ( $\beta/k_0$ ) ainda é menor do que 1. Quando  $\beta/k_0$  é maior do que 1 e menor do que a raiz de  $\epsilon_z$ , o campo começa a apresentar uma distribuição próxima de uma distribuição constante.

Para uma mesma freqüência, a anisotropia diminui o valor da constante de propagação, fazendo com que a distribuição do modo HE<sub>11</sub> fique quase constante para uma faixa maior de freqüência.