

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 TE₁₁.

Inicialmente foi estudado o guia cilíndrico oco, onde foi observado o comportamento do modo TE₁₁.

4.2. Estruturas Conhecidas

4.2.1. Guia Cilíndrico Oco (modo principal TE₁₁)

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 ρ' é a variação do raio.

A Figura 4.1 ilustra a distribuição de campo vetorial na abertura circular do modo TE₁₁, 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.

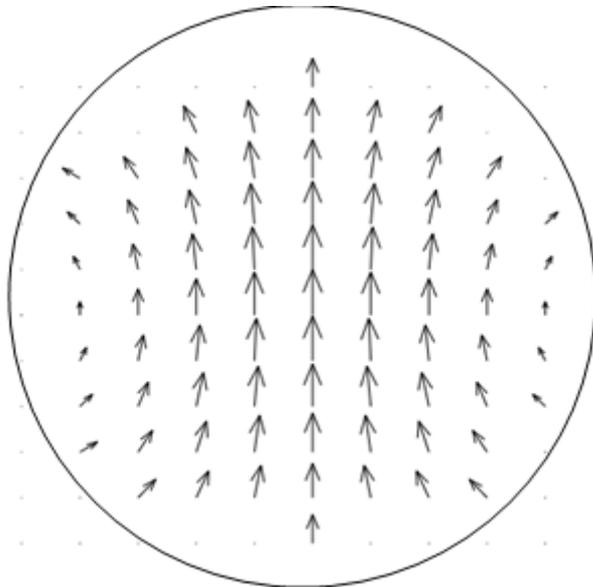


Figura 4.1 - Campo Vetorial na abertura circular do modo TE₁₁ no plano terra, para guia cilíndrico oco, $a = r_0 = 63,17$ mm.

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 EH₁₁ e HE₁₁ 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].

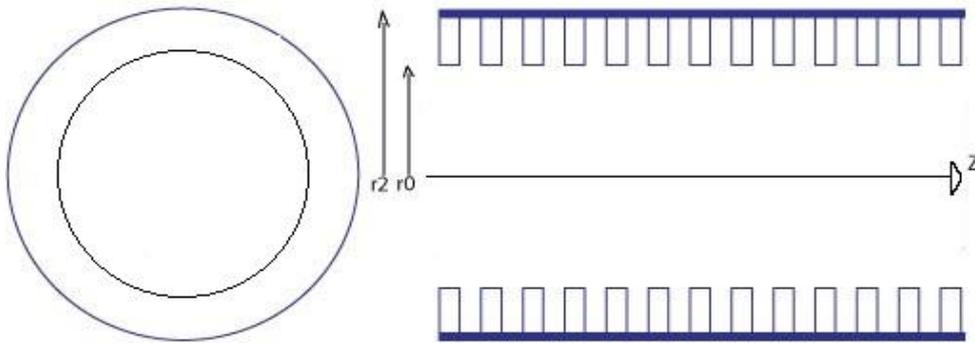


Figura 4.2 - Guia cilíndrico corrugado com raio interno $r_0 = 63,17$ mm e profundidade de corrugação $d = 14$ mm, com $r_2 = r_0 + d$.

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.

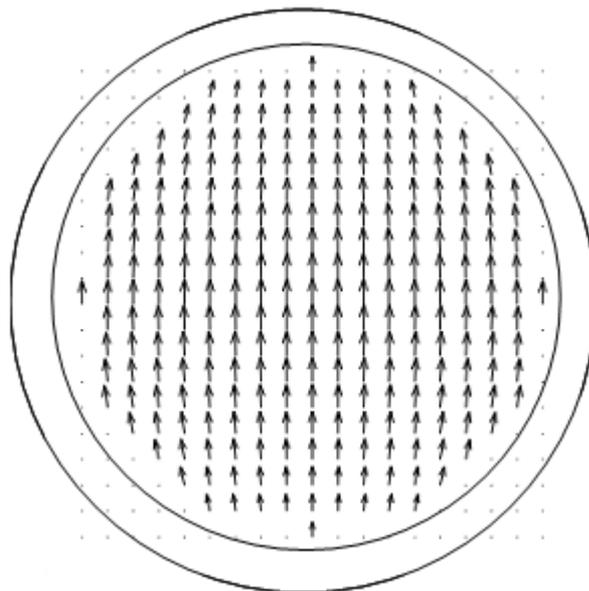


Figura 4.3 - Campo Vetorial na abertura circular do guia corrugado do modo EH11, com $r_0 = 63,17$ mm, $d = 14$ mm, $r_2 = 77,17$ mm, $k_0 = 48,05$, $\beta/k_0 = 0,941$.

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.

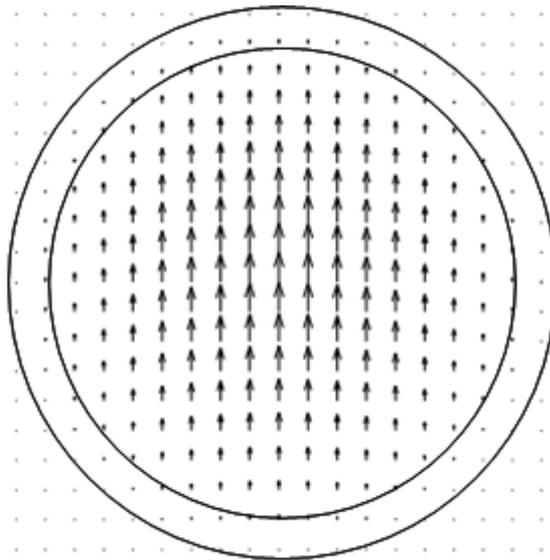


Figura 4.4 - Campo Vetorial na abertura circular do guia corrugado para o modo HE11, parâmetros $r_0 = 63,17$ mm, $d = 14$ mm, $r_2 = 77,17$ mm $k_0 = 112,28$, $\beta/k_0 = 0,941$.

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 $\beta/k_0 = 1,4$.

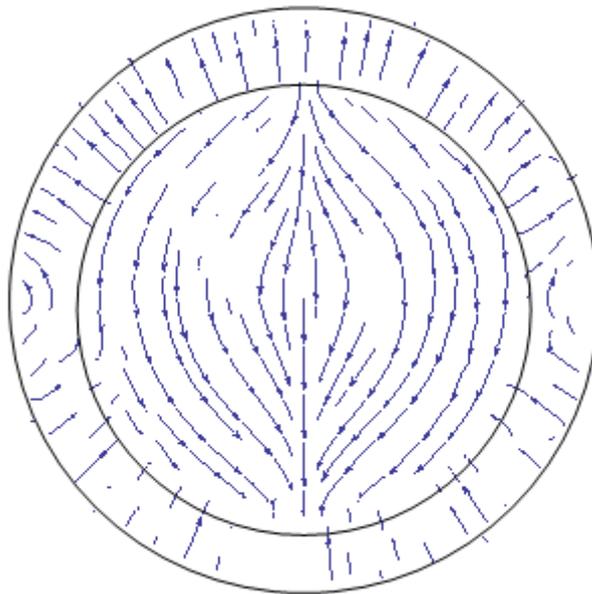


Figura 4.5 - Campo Vetorial na abertura circular do guia cilíndrico metálico com dielétrico de $\epsilon_r = 1,15$, do modo EH11, $r_0 = 63,17$ mm, $r_1 = 50,54$ mm, $k_0 = 200$, $\beta/k_0 = 1,4$.

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 influencia 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.

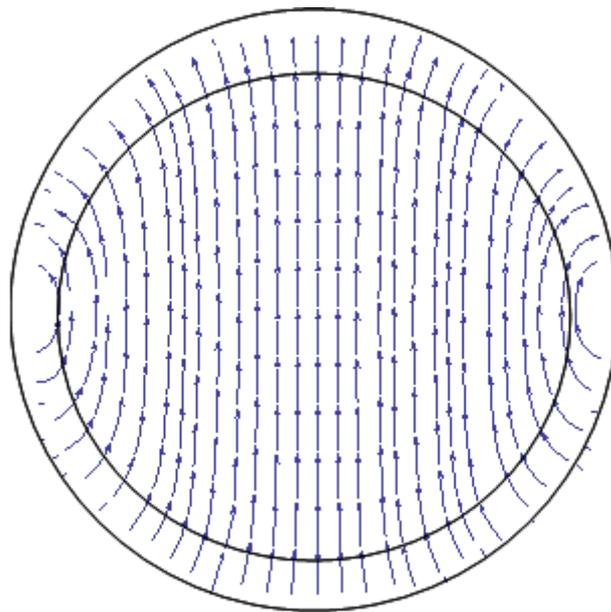


Figura 4.6 - Campo Vetorial na abertura circular para o guia cilíndrico metálico com dielétrico de $\epsilon_r = 1,15$ do modo HE11, raio $r_0 = 63,17$ mm, $r_1 = 50,54$ mm, $k_0 = 200$, $\beta/k_0 = 0,9756$.

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

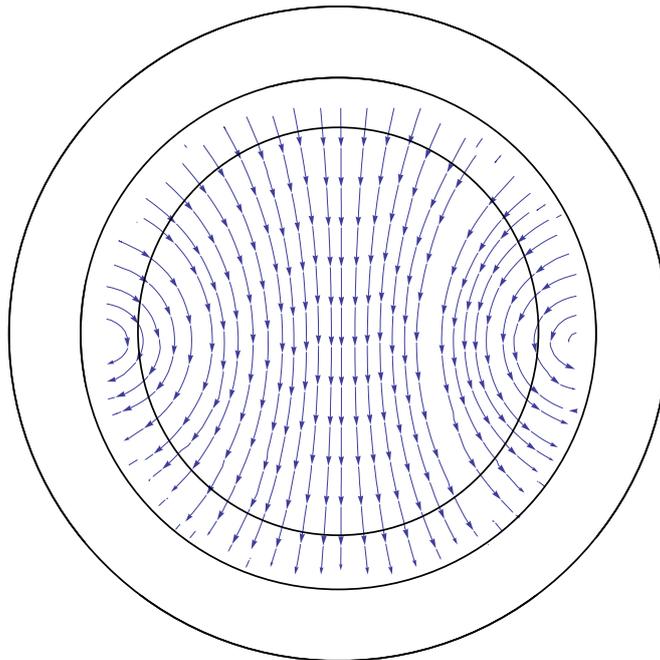


Figura 4.7 - Campo Elétrico na Abertura do guia cilíndrico corrugado com bastão dielétrico, EH11, $\epsilon_z = \epsilon_t = 1,15$, $r_0 = 63,17$ mm, $r_1 = 50,54$ mm, $r_2 = 77,17$ mm, $k_0 = 51,25$, $\beta/k_0 = 1,0544$.

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).

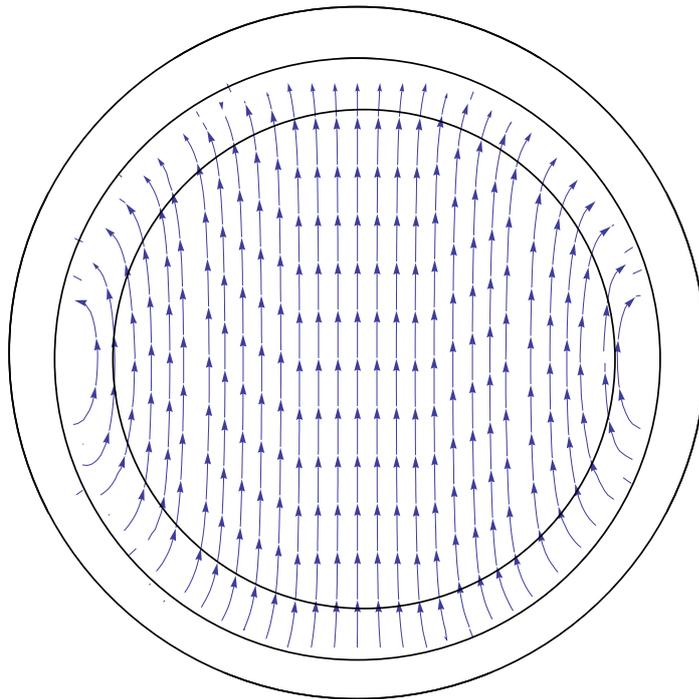


Figura 4.8 - Campo Elétrico na Abertura do guia cilíndrico corrugado com bastão dielétrico isotrópico, modo HE11, $\epsilon_z = \epsilon_t = 1,15$, $r_0 = 63,17$ mm, $r_1 = 50,54$ mm, $r_2 = 77,17$ mm, $k_0 = 200$, $\beta/k_0 = 1,0544$.

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 HE₁₁ 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 HE₁₁. O modo EH₁₁ 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, β/k_0 aumenta, conforme aumenta a frequência. Conforme β/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 HE₁₁ 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) $k_0 = 150$, $\beta/k_0 = 1,1927$.

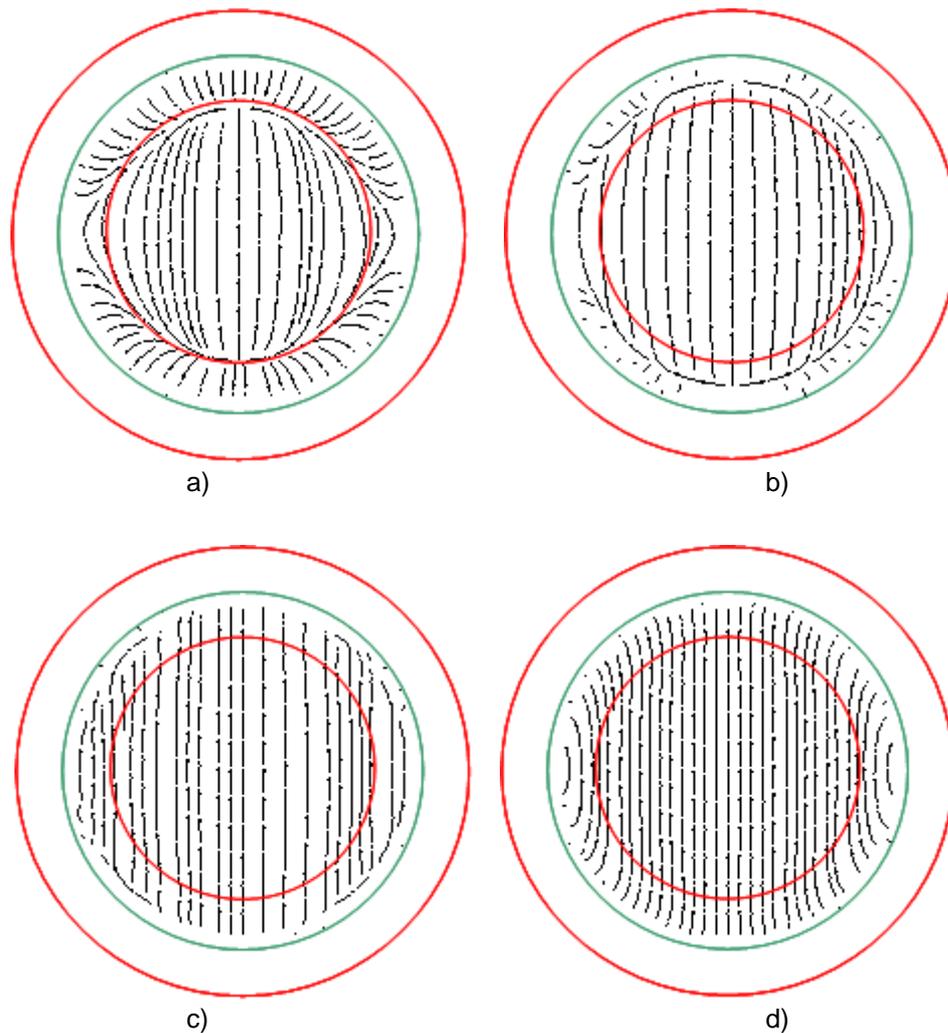


Figura 4.9 - Campo elétrico para modo HE11 de um guia cilíndrico corrugado com dielétrico isotrópico com permissividade relativa igual a 1,5. a) $k_0 = 65$, $\beta/k_0 = 1,0177$; b) $k_0 = 85$, $\beta/k_0 = 1,1233$; c) $k_0 = 105$, $\beta/k_0 = 1,1607$; d) $k_0 = 150$, $\beta/k_0 = 1,1927$.

Verificou-se que enquanto β/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 HE11 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 β/k_0 aumenta conforme aumenta a frequência. Conforme β/k_0 aumenta, a distribuição do campo elétrico melhora até atingir o ponto de balanceamento ($\beta/k_0 = 1,225 = \text{raiz de } \epsilon_z$).

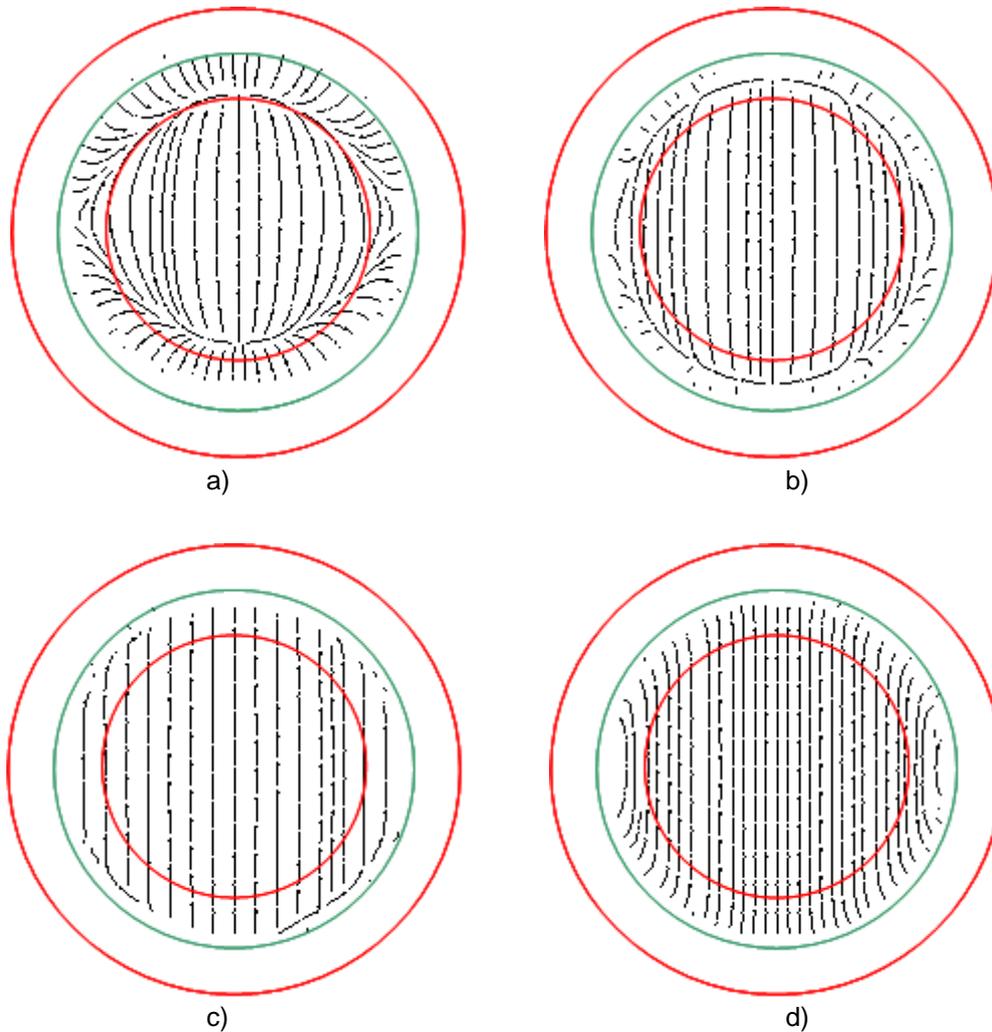


Figura 4.10 - Campo elétrico para modo HE₁₁ de um guia cilíndrico corrugado com dielétrico anisotrópico com permissividade $\epsilon_z = 1,5$, $\epsilon_t = 1,1$. a) $k_0 = 65$, $\beta/k_0 = 1,013$; b) $k_0 = 85$, $\beta/k_0 = 1,1273$; c) $k_0 = 105$, $\beta/k_0 = 1,1636$; d) $k_0 = 150$, $\beta/k_0 = 1,1940$.

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 β/k_0 atingir raiz de ϵ_z , como pode ser visualizado nas Figuras 4.11.

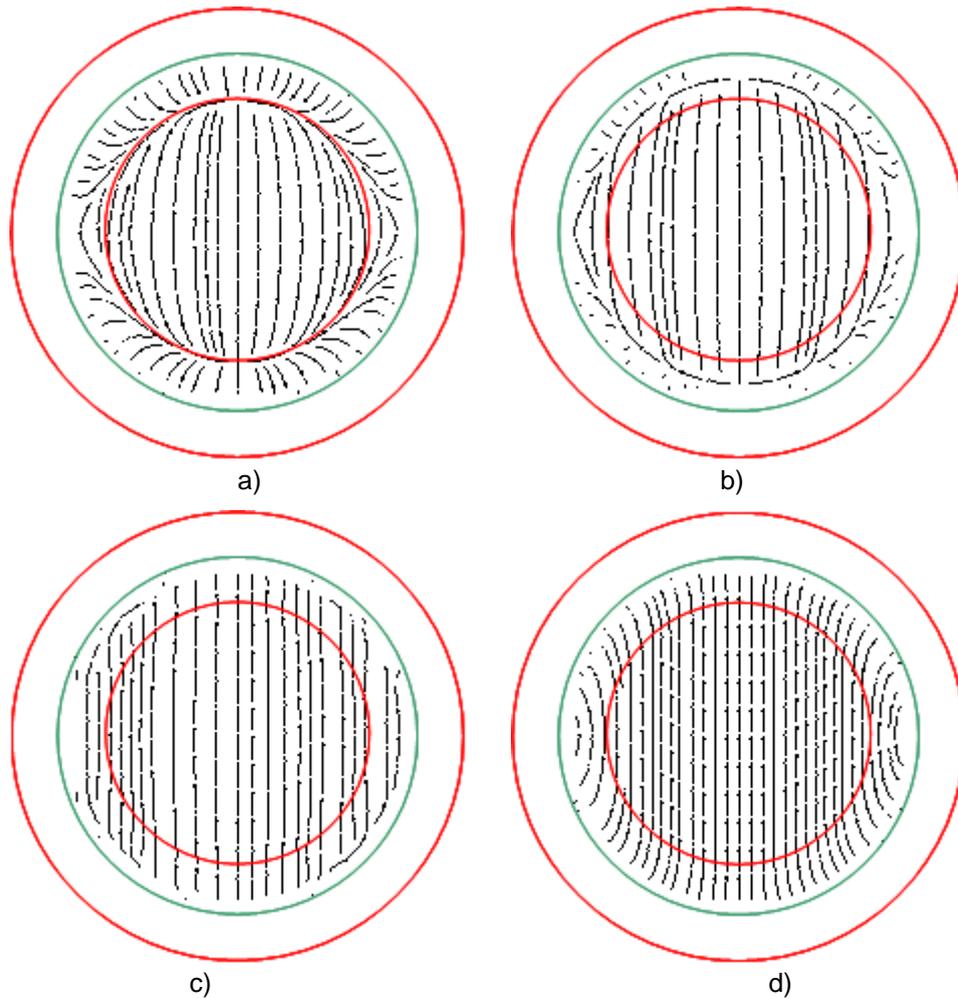


Figura 4.11 - Campo elétrico para modo HE₁₁ de um guia cilíndrico corrugado com dielétrico anisotrópico com $\epsilon_z = 1,1$ e $\epsilon_t = 1,5$. a) $k_0 = 65$, $\beta/k_0 = 0,81092$; b) $k_0 = 85$, $\beta/k_0 = 0,9322$; c) $k_0 = 105$, $\beta/k_0 = 0,97726$; d) $k_0 = 150$, $\beta/k_0 = 1,0152$.

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

Verifica-se das Figuras 4.9, 4.10 e 4.11 que quando ϵ_z diminui, para o mesmo valor de k_0 , os valores de β/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 TE₁₁ do caso de guia cilíndrico oco, é o modo HE₁₁, 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 (β/k_0) ainda é menor do que 1. Quando β/k_0 é maior do que 1 e menor do que a raiz de ϵ_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 HE₁₁ fique quase constante para uma faixa maior de freqüência.